

Universidade Federal do Rio de Janeiro

COMO OS PRODUTOS GLOBAIS DE ÁREA QUEIMADA
REPRESENTAM OS PADRÕES DE FOGO NO CERRADO? UMA
AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DAS COLEÇÕES MCD64A1

Julia Abrantes Rodrigues

2018



UFRJ

COMO OS PRODUTOS GLOBAIS DE ÁREA QUEIMADA
REPRESENTAM OS PADRÕES DE FOGO NO CERRADO? UMA
AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DAS COLEÇÕES MCD64A1

Julia Abrantes Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (Área: Meteorologia).

Orientadores: D. Sc. Renata Libonati dos Santos e D. Sc. Leonardo de Faria Peres.

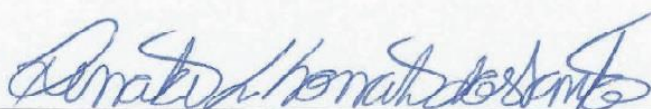
Rio de Janeiro
Novembro de 2018

**COMO OS PRODUTOS GLOBAIS DE ÁREA QUEIMADA REPRESENTAM
OS PADRÕES DE FOGO NO CERRADO? UMA AVALIAÇÃO DE PRECISÃO
DAS COLEÇÕES MCD64A1**

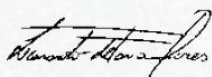
JULIA ABRANTES RODRIGUES

PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

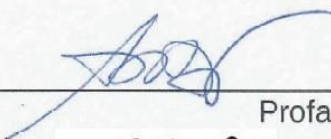
Examinada por:



Prof. Dra. Renata Libonati dos Santos



Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres



Prof. Dra. Ana Maria Bueno Nunes



Prof. Dr. Allan Arantes Pereira



Dra. Joana Messias Pereira Nogueira

Rio de Janeiro (RJ)

Nov/2018

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me conduzido por um caminho que eu não seria capaz de escolher sozinha.

À minha família e meu namorado, por todo apoio, compreensão e palavras de incentivo que me ajudaram a seguir em frente nos momentos de desespero.

À minha amiga Liz, que me acompanha na jornada acadêmica desde a graduação.

Aos meus orientadores e colaboradores, pela base, aprendizado, amizade e tempo dedicado à minha pesquisa. Em especial, à Renata, que acredita no meu potencial.

À Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (Funcate) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela bolsa de consultoria no âmbito do Projeto Cerrado Jalapão, e à Fundação Arthur Bernardes (Funarbe) e ao Instituto Serrapilheira pela bolsa de estudos concedida pelo Projeto de Pesquisa intitulado “FIRE, VEGETATION AND ATMOSPHERE INTER-RELATIONSHIPS: UNDERSTANDING THE FIRE REGIMES IN CERRADO AND AMAZON FOREST USING REMOTE SENSING” no decorrer do meu curso de mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMO OS PRODUTOS GLOBAIS DE ÁREA QUEIMADA REPRESENTAM OS
PADRÕES DE FOGO NO CERRADO? UMA AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DAS
COLEÇÕES MCD64A1

Julia Abrantes Rodrigues

Novembro/2018

Orientadores: Renata Libonati dos Santos

Leonardo de Faria Peres

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

O Cerrado é significativamente e reiteradamente afetado por queimadas antrópicas todos os anos, o que torna a região uma fonte importante de emissões de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera, contribuindo para as mudanças climáticas globais. Monitorar e entender a dinâmica atual do fogo e os padrões de mudanças da cobertura do solo no Cerrado requer uma quantificação das incertezas dos produtos de área queimada derivados de satélite para todo o bioma. No entanto, ainda faltam estudos que analisem, sobre toda a região, a concordância entre os produtos globais atualmente disponíveis e que levem em consideração a localização e extensão da área queimada. Neste contexto, realizamos uma avaliação da acurácia da nova coleção 6 (C6) do produto de área queimada MCD64A1 do sensor *MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que foi recentemente adotada como o produto padrão MODIS de área queimada. A abordagem de validação foi conduzida com o uso de dados de referência derivados do satélite Landsat-8 em uma área de 2.227.680 km², abrangendo todo o Cerrado. O procedimento também explorou a intercomparação da C6 com i) a coleção anterior 5.1 (C5.1), ii) focos ativos independentes do sensor *Visible*

Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) e iii) padrões de uso do solo de 2013 a 2016, permitindo uma perspectiva única sobre os principais desafios na detecção de áreas de queimadas sobre o Cerrado. Posteriormente, a caracterização espaço-temporal das áreas queimadas foi conduzida com a aplicação de técnicas de estatística descritiva e inferencial, e análises de séries temporais e espaciais. Os resultados da avaliação de qualidade evidenciam uma melhora geral no mapeamento da C6 para o bioma Cerrado. Especificamente, dentre as cenas validadas, 61% aumentaram o acerto, 90% reduziram a omissão, 74% aumentaram a comissão e 92% estimaram maior quantidade de área queimada. A concordância observada com os focos ativos VIIRS ($\tau = 0,74$, $dp = 0,033$) confirmou a capacidade da C6 de rastrear os padrões espaciais de área queimada sobre a região. A caracterização do regime de fogo no Cerrado utilizando a C6 indica que 2007 e 2010 foram anos extremos com anomalia padronizada positiva acima de 2 desvios padrão, enquanto 2009 foi um ano anormalmente negativo. A variabilidade sazonal indica uma estação do fogo de junho a outubro, e o mês de setembro como o mais crítico. O Cerrado setentrional possui a maior densidade de área queimada, onde há o maior remanescente de vegetação natural, coincidindo com a localização de áreas de proteção ambiental. Enquanto isso, o Cerrado meridional vivenciou um acelerado processo de conversão do solo em agricultura, induzindo paisagens fragmentadas e pequenas manchas de fogo. Por fim, verificou-se que o uso do solo influencia fortemente os padrões das áreas queimadas e dos erros, configurando um gradiente norte-sul bem definido.

Palavras-chave: Cerrado; Áreas queimadas; Sensoriamento remoto; MODIS; Validação.

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HOW WELL DO GLOBAL BURNED AREA PRODUCTS REPRESENT THE FIRE PATTERNS IN THE BRAZILIAN SAVANNAS BIOME? AN ACCURACY ASSESSMENT OF THE MCD64A1 COLLECTIONS

Julia Abrantes Rodrigues

November/2018

Advisors: Renata Libonati dos Santos
Leonardo de Faria Peres

Department: Meteorology

The Cerrado is significantly and repeatedly affected every year by anthropic fires, which makes the region an important source of greenhouse gas emissions and aerosols in the atmosphere, contributing to global climate change. Monitoring and understanding current fire dynamics and changes patterns over Cerrado requires a biome-level quantification of uncertainties from satellite-derived burned area (BA) products. However, there is still a lack of studies analyzing the agreement among currently available global BA products for the entire region that take into account the burned area location and extension. In this context, we performed an accuracy assessment of the new global MODerate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS) BA product (MCD64A1) collection 6 (C6) which was recently adopted as the standard MODIS BA product. The validation approach was conducted over an area of 2,227,680 km² encompassing the whole Brazilian Savannas (Cerrado) through the use of BA reference data derived from Landsat-8. The procedure also exploited the intercomparison with i) the previous collection 5.1 (C5.1), ii) independent active fires from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) and iii) land use patterns from 2013 to 2016 allowing a unique perspective into challenges in burning area detection over the region.

Then, we characterized the spatiotemporal distribution of the BAs by applying descriptive and inferential statistical techniques, as well as spatial and temporal series analyzes. The comparison results between C5.1 and C6 show an overall improvement when the latter is used to map BA over the Cerrado biome. Specifically, among the validated scenes, 61% increased the hit, 90% reduced the omission, 74% increased the commission, and 92% estimated great amounts of BA. The observed agreement with the VIIRS active fires ($\tau = 0.74$, $sd = 0.033$) confirmed the C6 ability to track the spatial patterns of BA over the region. The fire regime characterization in the Cerrado using the C6 indicates 2007 and 2010 as the most severe years with a standardized anomaly above two standard deviations, while anomalously low values of BA marked 2009. The seasonal variability analysis indicates a well-marked fire season between June and October with September being the most critical month. The highest density of BA occurs on the northern Cerrado where there are the most significant remnants of natural vegetation and coincide with the environmental protection areas locations. Meanwhile, the southern Cerrado experienced an accelerated land conversion process from natural vegetation to agriculture, leading to fragmented landscapes and small fire patches. Finally, we verified the strong influence of land-use on the BAs distribution and the errors patterns, both showing a sharp north-south gradient.

Keywords: Cerrado; Burned areas; Remote sensing; MODIS; Validation.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE ACRÔNIMOS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Contribuições.....	4
2. ESTADO DA ARTE.....	4
2.1. Breve histórico acerca dos produtos de área queimada	4
2.2. Avaliação do desempenho do produto de área queimada MCD64A1.....	6
2.3. Caracterização das áreas queimadas do Cerrado	8
3. ÁREA DE ESTUDO	9
4. DADOS E MÉTODOS	10
4.1. Dados principais.....	10
4.1.1. Sensor MODIS	10
4.1.2. Produtos de área queimada MODIS.....	13
4.1.3. Dado de referência de área queimada – Landsat/INPE.....	15
4.2. Dados auxiliares	16
4.2.1. Focos ativos.....	16
4.2.2. Mapa de uso e cobertura do solo.....	16
4.2.3. Áreas de proteção ambiental	18
4.3. Métodos	18
4.3.1. Verificação do produto.....	19
4.3.1.1. Pré-processamento dos dados.....	21
4.3.1.2. Validação das coleções	21
4.3.1.3. Análise regional e temporal com focos ativos	25
4.3.1.4. Relação entre uso do solo e avaliação de área queimada	25
4.3.2. Aplicação do produto	26
4.3.2.1. Caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado (2003 a 2017)	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27

5.1. Validação.....	27
5.1.1. Análise estatística geral	27
5.1.2. Análise estatística estratificada	35
5.1.3. Comparação com uso do solo	40
5.2. Caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado (2003 a 2017).....	44
6. CONCLUSÕES	54
7. REFERÊNCIAS	56
ANEXO	69
PUBLICAÇÕES	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo e das áreas de proteção (unidades de conservação estaduais e federais e terras indígenas) que a compõe.....	10
Figura 2 – Mapa de uso e cobertura do solo do Cerrado, de acordo com o produto MODIS MCD12Q1-IGBP C6 500 m.....	17
Figura 3 – Grade Landsat que cobre o Cerrado, composta por 113 cenas, das quais 84 foram possíveis de validar. Os números centrais representam a órbita_ponto da cena e os subscritos representam a quantidade de imagens que compuseram o período de validação.....	23
Figura 4 – Dois mapas temáticos dicotômicos típicos cobrindo a mesma área: um derivado de imagens de baixa resolução espacial (superior esquerdo) e o outro, de alta resolução espacial (superior direito). Embaixo, é mostrada a sobreposição de ambos os mapas.....	24
Figura 5 – Percentagem de a) Índice Crítico de Acerto (ICA), b) Erro de Omissão (EO), c) Erro de Comissão (EC) e d) Viés (V) do MCD64A1 (i) C5.1, (ii) C6 e (iii) a diferença entre as coleções ($\Delta = C6 - C5.1$). Os círculos claros representam o tamanho médio das cicatrizes (em ha) obtido pela razão entre a área total queimada e o número de cicatrizes validadas, considerando as cicatrizes selecionadas em cada cena.....	28
Figura 6 – Exemplos da avaliação de precisão do produto MCD64A1 em relação às cicatrizes de referência: (i) Composição Landsat RGB 754 falsa cor mostrando cicatrizes queimadas em quatro cenas Landsat, representada pela última data usada na validação: a) 219_074, b) 220_075, c) 221_067, e d) 225_073. Comparação entre os resultados da validação de MCD64A1 (ii) C5.1 e (iii) C6 nas zonas selecionadas, destacando os acertos de queimada (A, %, verde) e os erros de omissão (O, %, azul) e comissão (C, %, vermelho).....	32
Figura 7 – Gráficos de dispersão com as relações entre o total anual de área queimada (km^2) das coleções 5.1 e 6 do MCD64A1 e o número total de focos ativos VIIRS em uma grade de 25×25 km. Cada subfigura (a-d) representa a correlação para os anos de 2013 a 2016. A linha de regressão (em azul) e o coeficiente Tau de Kendall (τ) também são exibidos em cada plotagem	34

Figura 8 – Frequência (i) do número de cicatriz (% , barras tracejadas) e (ii) do total de área queimada (% , barras sólidas) por classe de tamanho de cicatriz (25–100 ha, 100–1500 ha e > 1500 ha) para cada grupo: Grupo 1 (200 a 2.000 focos ativos VIIRS, barras amarelas), Grupo 2 (2.001 a 10.000 focos ativos VIIRS, barras amarelo-escuro), Grupo 3 (10.001 a 20.000 focos ativos VIIRS, barras laranja) e Grupo 4 (20.001 a 35.000 focos ativos VIIRS, barras vinho).....	36
Figura 9 – Gráficos de caixa com os resultados das medidas de avaliação de precisão (i) Índice Crítico de Acerto - ICA, Erro de Omissão - EO, Erro de Comissão - EC e (ii) Viés - V para MCD64A1 C5.1 (caixas tracejadas) e MCD64A1 C6 (caixas sólidas), categorizados de acordo com as classes da Figura A1: a) Grupo 1 - 200 a 2.000 focos ativos VIIRS, b) Grupo 2 - 2.001 a 10.000 focos ativos VIIRS, c) Grupo 3 - 10.001 a 20.000 focos ativos VIIRS e d) Grupo 4 - 20.001 a 35.000 focos ativos VIIRS	37
Figura 10 – a) Falsos alarmes (EC_{FA} , %, barras tracejadas, i) e omissões de cicatrizes (EO_{OC} , %, barras sólidas, ii) por grupo para cada coleção MCD64A1: C5.1 (barras cinza-escuro) e C6 (barras cinza-claro); b) Proporção de falsos alarmes (EC_{FA} , %) e comissões de borda (EC_B , %) na área total do erro de comissão (barras em tons de vermelho, i), e proporção de omissões de cicatrizes (EO_{OC} , %) e omissões parciais (EO_P , %) na área total do erro de omissão (barras em tons de azul, ii) por grupo e para cada coleção MCD64A1: C5.1 (barras tracejadas) e C6 (barras sólidas)	39
Figura 11 – Distribuição da intensidade do uso do solo no Cerrado no ano de 2015, por cena Landsat validada. O conjunto de dados utilizado para avaliar a intensidade do uso do solo foi o produto MCD12Q1-IGBP C6. As cores representam o uso do solo ocupando entre 0–50% (baixa, amarelo), 51–75% (média, marrom-claro) e 76–100% (alta, marrom-escuro) de cada cena, considerando as classes <i>Grasslands</i> , <i>Croplands</i> e <i>Cropland/Natural Vegetation Mosaic</i>	41
Figura 12 – Variabilidade sazonal das áreas queimadas (km ²) no Cerrado, com base na média mensal do período de 2003 a 2017, de acordo com o MCD64A1 C6	45
Figura 13 – Variabilidade temporal das áreas queimadas no Cerrado no período de 2003 a 2017, de acordo com o MCD64A1 C6 a) total anual das áreas queimadas (km ²), apresentando as parcelas referentes às áreas protegidas e às áreas externas a elas; e b) Anomalia padronizada interanual das áreas queimadas.	46

Figura 14 – Localização das áreas protegidas do Cerrado com maior total de área queimada acumulado no período de 2003 a 2017	49
Figura 15 – Variabilidade interanual da anomalia padronizada das áreas queimadas em cada célula da grade de 25 x 25 km do Cerrado no período de 2003 a 2017	50
Figura 16 – Variabilidade interanual da área queimada normalizada (AQN) em cada célula da grade de 25 x 25 km do Cerrado no período de 2003 a 2017. A AQN é definida como a razão entre o total de área queimada em cada célula e a área da célula (km ²)	52
Figura 17 – Três <i>clusters</i> classificados no Cerrado a) distribuição espacial e b) série média mensal (2003-2017) da área queimada normalizada (AQN). Estas piro-regiões correspondem a regimes de fogo relativamente homogêneos na grade de 25 x 25 km. Os polígonos delimitados em (a) correspondem às áreas protegidas mais afetadas pelo fogo apontadas na Figura 14	53
Figura 18 – a) Densidade de área queimada (km ²) e b) mês com a maior frequência de pixels classificados como queimada no Cerrado em cada célula da grade de 25 x 25 km no período de 2003 a 2017	54
Figura A1 – Total de focos ativos detectados pelo sensor VIIRS/Suomi-NPP 375 m em cada cena Landsat do Cerrado em 2015	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas do sensor MODIS.	11
Tabela 2 - Características espectrais das bandas 1-19 do sensor MODIS.....	11
Tabela 3 - Características espectrais das bandas 20-36 do sensor MODIS	12
Tabela 4 - Tabela de contingência 2 x 2 para eventos de queimada	21
Tabela 5 - Resumo do número de cenas da comparação entre classes de intensidade do uso do solo (IUS) (baixa, 0–50%; média, 51–75%; e alta, 76–100%) da Figura 11 e os intervalos dos erros de omissão (EO) e comissão (EC) (0–25%, 26–50%, 51–75% e 76–100%) da Figura 5 para MCD64A1 C5.1 e C6	43
Tabela 6 - Classificação das cinco áreas protegidas (APs) com maior total acumulado de área queimada e os respectivos valores, em km ² , por categoria (UCPI, UCUS e TI), no domínio do Cerrado no período de 2003 a 2017	48
Tabela A1 - Número de imagens utilizadas na validação, por cena, e os meses correspondentes	69
Tabela A2 - Resultados quantitativos da avaliação de precisão das coleções 5.1 e 6 do produto de área queimada MCD64A1 (C5.1 e C6) para o Cerrado em 2015: Índice Crítico de Acerto (ICA, %), Erro de Omissão (EO, %), Erro de Comissão (EC, %) e Viés (V) por cena Landsat validada. A área total das cicatrizes de referência (ha) e o grupo ao qual cada cena pertence também são apresentados na tabela.....	73
Tabela A3 - Área queimada mensal, em km ² , no Cerrado de 2003 a 2017. As extremidades da tabela apresentam o total mensal (TM), o total anual (TA), o total anual em UCPI (TUCPI), o total anual em UCUS (TUCUS) e o total anual em TI (TTI), em km ² , e as respectivas contribuições relativas ao total geral (%)	75
Tabela A4 - Frequência espacial anual da anomalia padronizada (Z, %) de área queimada no Cerrado no período de 2003 a 2017, baseada na grade de 25 x 25 km, por grau de intensidade: -4 – -3; -3 – -2, -2 – -1; 1 – 2; 2 – 3; e 3 – 4.....	76

LISTA DE ACRÔNIMOS

- AP – Área protegida
- APA – Área de Proteção Ambiental
- AQN – Área queimada normalizada
- ATSR-2 – *Along Track Scanning Radiometer 2*
- C5.1 – Coleção 5.1 do produto de área queimada MCD64A1
- C6 – Coleção 6 do produto de área queimada MCD64A1
- CBERS – *China-Brazil Earth Resources Satellite*
- CCI – *Climate Change Initiative*
- CO₂ – dióxido de carbono
- CRNBRL – Taxa de mudança entre imagens consecutivas de NBRL
- CRNDVI – Taxa de mudança entre imagens consecutivas de NDVI
- DNBRL – Limiar de diferença temporal de NBRL
- EC – Erro de comissão
- EC_B – Erro de comissão de borda
- EC_{FA} – Erro de comissão de falso alarme
- EE – Estação Ecológica
- EO – Erro de omissão
- EO_{OC} – Erro de omissão de cicatriz
- EO_P – Erro de omissão parcial
- EOS – *Earth Observing System*
- ERS-2 – *European Remote Sensing 2*
- ESA – *European Space Agency*
- EVI – *Enhanced Vegetation Index*
- Funai – Fundação Nacional do Índio
- GBA2000 – *Global Burned Area 2000*
- GFED-4 – *Global Fire Emissions Database 4*
- GPS – *Global Positioning System*
- Ibama – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICA – Índice Crítico de Acerto
- IGBP – *International Geosphere Biosphere Programme*
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IUS – Intensidade do uso do solo

JRC – *Joint Research Centre*

MATOPIBA – Referência aos estados do MA, TO, PI e BA

MERIS – *MEdium Resolution Imaging Spectrometer*

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MODIS – *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*

MRT – *MODIS Reprojection Tools*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NBRL – *Normalized Burn Ratio Long SWIR Variation*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OLI – *Operational Land Imager*

PE – Parque Estadual

PN – Parque Nacional

Prevfogo – Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais

QA – Nível de confiabilidade da classificação MCD45A1

SPOT-4 – *Satellite Pour l'Observation de la Terre 4*

Suomi-NPP – *Suomi National Polar-orbiting Partnership*

SWIR – Infravermelho de ondas curtas

TI – Terra Indígena

TM – *Thematic Mapper*

UC – Unidade de Conservação

UCPI – Unidade de Conservação de Proteção Integral

UCUS – Unidade de Conservação de Uso Sustentável

V – Viés

VIIRS – *Visible Infrared Imager Radiometer Suite*

WWF – *World Wildlife Fund*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, houve um crescente interesse em compreender os fatores que determinam as mudanças climáticas, em parte, devido às evidências de que a intervenção humana acelere tais alterações, acarretando no aquecimento global (Latorre et al., 2003; Golding e Betts, 2008; Bowman et al., 2009). Dentre estes fatores, estão as queimadas na vegetação, que impactam diferentes ecossistemas e têm mobilizado esforços com o intuito de melhorar a compreensão a respeito destes eventos (Pessoa et al., 2005). Aproximadamente, 60% do aquecimento global são atribuídos ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Lashof, 1996), sendo que este gás representa cerca de 90% das emissões de gases liberados durante as queimadas (Levine et al., 1996). Caso as emissões de gases do efeito estufa continuem crescendo às taxas atuais, a superfície do planeta poderá aquecer 1,5°C antes do final do século XXI (IPCC, 2018). Neste contexto, a proporção da área afetada pelo fogo é uma das variáveis cruciais para quantificar a contribuição das emissões da queima de biomassa em escala global (Crutzen et al., 1979).

No Cerrado, a savana brasileira, o fogo faz parte da história do seu cenário e é um fator ambiental essencial para a manutenção e conservação dos ecossistemas do bioma, quando associado à determinada frequência, intensidade e época do ano (Pivello, 2006). Porém, o fogo precisa ser fiscalizado por políticas de gestão de incêndios, devido ao seu uso desenfreado nas atividades humanas (Durigan e Ratter, 2016), como manejo de agricultura, renovação de pastagens, dentre outras. Ocasionalmente, fatores naturais tais como raios também são meios de ignição de queimadas (Piromal et al., 2008), porém menos frequentes no Cerrado. As queimadas ocorrem todos os anos, principalmente durante a estação seca, com maior incidência ao final deste período devido à vulnerabilidade da vegetação ao fogo (Coutinho, 1990). Pelo lado das vertentes meteorológicas, a queima de biomassa tem impactos negativos, tanto a partir de causas antrópicas quanto de processos naturais, pois perturba a química da atmosfera global através da liberação de gases de efeito estufa e aerossóis (Le Page et al., 2002; Sá et al., 2003; Sousa et al., 2003). Também altera o albedo da superfície pela modificação ou destruição da estrutura vegetal e pelo depósito de carvão e cinzas. Por sua vez, estas mudanças alteram as propriedades físicas da superfície, tais como a relação entre fluxo de calor latente e sensível (balanço de energia), transferência de momento da atmosfera e fluxo de umidade por evaporação e transpiração (Sellers et al., 1996; Jin e Roy, 2005). Vale ressaltar que, no Cerrado, encontram-se as nascentes das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata). A ocorrência desenfreada do fogo resseca o solo, reduz a velocidade e a quantidade de infiltração da água

(Ferreira et al., 2008), impactando negativamente estas nascentes, além de poluir corpos d'água com as cinzas carregadas pela chuva após a queima.

O regime do fogo é controlado pelas condições climáticas locais (Pyne et al., 1996; Kunkel, 2001; Silva et al., 2016; Alencar et al., 2015), assim como também afeta o clima regional e global (IPCC, 2018), estabelecendo uma relação cíclica e altamente interdependente (Justino et al., 2011). Diferentes estudos demonstraram que existe uma correlação significativa entre padrões atmosféricos e a ocorrência de fogo na vegetação em diversos locais do globo (Flannigan e Wotton, 2001; Swetnam e Betancourt, 1990; Flannigan et al., 2000; Skinner et al., 2002; Pereira et al., 2005). Por exemplo, a variabilidade intra-anual do total de área afetada pelo fogo no Cerrado está relacionada diretamente com o regime sazonal de precipitação (Libonati et al., 2015; Pereira et al., 2011).

Neste contexto, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma excelente ferramenta na detecção de queimadas e na quantificação das áreas afetadas (Chuvienco et al., 2002, 2005; França, 2000; Libonati et al., 2015). Esta aplicação se deve à temporalidade de aquisição dos dados, bem como ao alcance de áreas remotas, de difícil acesso e à ampla cobertura espacial, tornando-o uma alternativa aos métodos tradicionais de campo para estimar áreas queimadas (Mouillot et al., 2014). A utilização destes dados para a avaliação dos efeitos do fogo aumentou consideravelmente nas últimas décadas, tanto de sensores de satélite de alta, como de média e baixa resolução, conforme necessidade do usuário (Ahern et al., 2001).

Consequentemente, muitos produtos de área queimada derivados de satélite foram desenvolvidos para monitoramento, modelagem e avaliação de risco do fogo (Mouillot et al., 2014). Por exemplo, no início dos anos 2000, o sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua da *National Atmospheric Space Agency* (NASA) foi configurado para fornecer dados sobre a dinâmica global terrestre, com monitoramento de longa duração para o entendimento de mudanças globais (Justice et al., 2002), em baixa resolução espacial. Desde então, o sensor MODIS tem sido utilizado com sucesso no monitoramento de atividades de incêndio (Giglio et al., 2016), estimativas de área queimada (Boschetti et al., 2015; Chuvienco et al., 2008; Libonati et al., 2015; Ramo e Chuvienco, 2017; Randerson et al., 2012) e investigação dos modelos de fogo em muitas regiões do mundo (Hantson et al., 2016; Nogueira et al., 2017a). Sendo assim, uma avaliação de precisão é necessária para quantificar o grau de concordância entre o mapeamento automático e o que é observado na superfície, principalmente devido a sua resolução espacial.

Assim como outros biomas ao redor do globo, o Cerrado necessita de uma coexistência mais sustentável com o fogo, o que requer uma compreensão imparcial e bem

informada da ocorrência do fogo e seus efeitos (Santín e Doerr, 2016). Entretanto, ainda há carência de estudos que avaliem a concordância dos produtos globais disponíveis atualmente para toda a região. De fato, na maioria dos casos, não há informações sobre a precisão do produto a nível do bioma, apesar de toda sua ampla extensão e heterogeneidade. Qualquer tentativa de entender o funcionamento dos ecossistemas do Cerrado e a influência humana sobre eles requer a identificação de padrões de fogo em escala do bioma, incluindo uma avaliação da incerteza e uma análise de sensibilidade das estimativas (Gomes et al., 2018). Portanto, o conhecimento das limitações dos produtos de área queimada também é indispensável para realização da caracterização do regime do fogo, de forma a estimar as incertezas associadas ao processo.

Nesta década, dois estudos caracterizaram as áreas queimadas do Cerrado e estabeleceram padrões do regime de fogo no bioma ao longo de uma série temporal. Entretanto, ambos utilizaram o produto de área queimada MODIS MCD45A1, que possui um algoritmo de precisão inferior ao MODIS MCD64A1 sobre savanas (Libonati et al., 2015; Alves et al., 2018). Além disso, somente pixels marcados como altamente confiáveis foram considerados nestes estudos, ocasionando uma maior subestimativa do total da área afetada pelo fogo. Adicionalmente, o produto MCD45A1 foi descontinuado pela NASA no início de 2018, encerrando o processamento e a distribuição deste dado. Desta forma, tais estudos fornecem uma compreensão inadequada sobre o comportamento do regime de fogo na região, justificando a necessidade de uma nova abordagem de caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado e das incertezas associadas, que inclua um produto mais refinado.

1.1. Objetivos

Neste contexto, o presente trabalho é baseado em dois objetivos principais:

- i) Quantificar as incertezas associadas às duas últimas versões do produto global de área queimada MCD64A1 do sensor MODIS, coleções 5.1 (C5.1) e 6 (C6), para o Cerrado;
- ii) Caracterizar a dinâmica do fogo no bioma em um período de 15 anos (2003-2017), de acordo com a coleção MCD64A1 que apresentar melhor acurácia na detecção das áreas queimadas. Especificamente, pretende-se estabelecer padrões espaço-temporais do regime de fogo através de sua variabilidade intra e interanual.

1.2. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho serão:

- i) Validação sistemática de todo o bioma Cerrado, heterogêneo e de grande extensão latitudinal, identificando as melhorias e ressalvas espaciais na detecção de áreas queimadas fornecidas pela recém-lançada C6 do MCD64A1;
- ii) Associação das incertezas do mapeamento ao uso do solo, fornecendo informações sobre as influências antropogênicas na precisão de detecção das coleções;
- iii) Revelar as regiões mais afetadas pelo fogo, seus padrões e suscetibilidades;
- iv) Informar quais partes protegidas do território sob um poder de gestão ambiental são mais afetadas pelo fogo;
- v) Colaborar com um futuro refinamento do algoritmo MCD64A1 para melhorar as estimativas de área queimada na região de estudo.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Breve histórico acerca dos produtos de área queimada

Um aspecto essencial do sensoriamento remoto de queimadas é o reconhecimento de que existem, basicamente, dois tipos diferentes de sinal: o de queimadas ativas, i.e., com a presença do fogo, e o das áreas queimadas, onde se observam as cicatrizes deixadas pelo fogo após sua extinção. O primeiro tipo de sinal é o registro instantâneo e pontual da combustão (fogo ativo ou foco de calor), enquanto que o segundo sinal é baseado na mudança das características espectrais da vegetação nas imagens obtidas pré e pós fogo (área queimada ou cicatriz). Entretanto, a maioria dos sensores utilizados na detecção de focos ativos e área queimada não foi projetada especificamente para este efeito, nomeadamente no que diz respeito às características de sensibilidade e saturação, resolução espacial, frequência de observações e metodologias de processamento. De fato, a estimativa de área queimada tem vindo a ser efetuada com base em diversos algoritmos, os quais tendem a produzir diferentes resultados quando utilizados para processar informação proveniente de sensores distintos ou em contextos diversos.

Durante os últimos anos, tem-se observado um grande esforço no desenvolvimento de produtos que mapeiam as áreas queimadas em escala global. Dentre estas iniciativas, destacam-se o *Global Burned Area 2000* (GBA2000) elaborado pelo *Joint Research Centre* (JRC) a partir de imagens do sensor VEGETATION a bordo do satélite *Satellite Pour l'Observation de la Terre 4* (SPOT-4) (Grégoire et al., 2003; Tansey et al., 2004); o produto da *European Space Agency* (ESA) chamado GlobScar (Simon et al., 2004) gerado com as

imagens do sensor *Along Track Scanning Radiometer 2* (ATSR-2) a bordo do satélite *European Remote Sensing 2* (ERS-2), ambos com resolução espacial de 1 km.

Destacam-se também os produtos de área queimada desenvolvidos com metodologia híbrida de mapeamento, integrando dados de focos ativos do sensor MODIS com imagens de reflectância. Por exemplo, os produtos MCD45A1 (Roy et al., 2006; Roy et al., 2008) e MCD64A1 (Giglio et al., 2006, 2009, 2018) fornecidos pela NASA, a partir de imagens MODIS com resolução espacial de 500 m. Há também o produto de área queimada desenvolvido no âmbito do programa *Climate Change Initiative* (CCI) da ESA, a partir de imagens do sensor *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) a bordo do satélite Envisat com resolução espacial de 300 m, nomeadamente MERIS FIRE_CCI (Alonso-Canas & Chuvieco, 2015). Recentemente, a ESA lançou um novo produto baseado nas bandas de maior resolução do MODIS (250 m), chamado MODIS Fire_CCI (Chuvieco et al., 2018). Na escala regional, para o Brasil, existe o produto AQM-MODIS 1 km (Libonati et al., 2010, 2015).

Entretanto, segundo diversos autores, grandes discrepâncias persistem nos produtos globais/regionais tanto na quantificação da extensão da área queimada quanto na sua localização espacial e temporal (Boschetti et al., 2004; Korontzi et al., 2004, Libonati et al., 2015; Nogueira et al., 2017a). Adicionalmente, a exatidão destes produtos varia ainda de forma significativa de acordo com o bioma (Chang e Song, 2009). Além disto, outra grande dificuldade dos produtos globais está relacionada com sua validação, a qual se torna complexa e onerosa por envolver áreas extensas e com características muito distintas.

Para que a caracterização do regime de fogo através de estimativa de área queimada via satélite seja confiável, torna-se necessária a realização de um controle de qualidade que informe aos usuários as limitações do produto e ainda que contenha informações resultantes de atividades de validação, como comparações com dados considerados de referência (Mouillot et al., 2014). A importância em validar produtos de satélites se deve aos seguintes fatores: 1) informações quantitativas sobre a qualidade do produto são fundamentais para diferentes usuários; 2) informações resultantes do próprio processo de validação ajudam a melhorar a geração dos produtos e 3) crescente utilização de produtos de satélite como suporte para a detecção de eventuais mudanças climáticas.

Usualmente, a validação se baseia em medidas realizadas *in situ* obtidas durante campanhas de campo e consideradas como representações da realidade. Entretanto, a validação de estimativas de área queimada por meio da comparação direta com medidas de campo apresentam dificuldades relacionadas não só com a grande extensão e localização

remota da maioria das ocorrências, mas também devido à rápida alteração do sinal espectral da cicatriz de queimada. Além disso, muitas ocorrências de queimadas localizam-se em propriedades privadas, o que dificulta a sua validação *in situ*. Neste sentido, é importante que informações *in situ* acerca da extensão e localização das áreas queimadas sejam obtidas em simultâneo ou, no máximo, alguns dias/semanas após a ocorrência do fogo, em locais de livre acesso. Informações com estas características podem ser coletadas através de sobrevoos sobre o local com equipamento adequado (por exemplo, aparelhos de *Global Positioning System* (GPS) e câmeras fotográficas), o que nem sempre está disponível devido ao alto custo envolvido. Uma alternativa consiste na escolha de locais, como as unidades de conservação (UCs) federais, onde existam informações sobre localização e extensão, fornecidas, por exemplo, pelas Brigadas de Incêndio no âmbito do programa Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama).

Na ausência de dados *in situ*, uma forma possível de solucionar o problema consiste na comparação visual e estatística com dados de satélites de média ou alta resolução espacial, que permitem observar a superfície terrestre com nível de detalhamento superior. Desta forma, pode-se efetuar a comparação estatística com os resultados de estimativa de área queimada obtidos com imagens de melhor resolução, nomeadamente com os satélites Landsat (15 e 30 m), *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS 20 m) e Sentinel (10 e 20 m).

No geral, as validações são realizadas para poucas, limitadas e pequenas áreas, obtendo resultados pontuais representativos de um local restrito (Araújo e Ferreira, 2015; dos Santos et al., 2018; Libonati et al., 2015; Nogueira et al., 2017a; Pereira et al., 2017), de forma a tornar a informação generalizada para cada bioma ou região do globo (continentes). Portanto, há a necessidade de estudos mais abrangentes, que traduzam o comportamento dos produtos de área queimada às diferentes composições de vegetação, tipos de solo e clima. Neste trabalho, é proposta a análise de uma área extensa representativa de todo o bioma Cerrado, contribuindo para as deficiências que envolvem o assunto.

2.2. Avaliação do desempenho do produto de área queimada MCD64A1

Giglio et al. (2009) procederam com a avaliação de precisão do algoritmo MCD64A1 C5.1, selecionando três regiões ecológica e geograficamente diversas: centro da Sibéria, oeste dos Estados Unidos e sul da África. O total das áreas queimadas diferiu em torno de 10% em todas as regiões, exceto nas áreas de maior cobertura de árvores, onde a classificação subestimou as áreas queimadas em 41%. Os autores afirmam que o tamanho mínimo de uma

cicatriz detectável é de cerca de 120 ha. Recentemente, Giglio et al. (2018) relataram que a C6 aprimorou significativamente a detecção de pequenas queimadas (entre 21 e 100 ha), reduziu modestamente a incerteza temporal da data de queima e reduziu a omissão de queimadas. Em virtude dos investimentos científicos em gerar produtos globais de área queimada cada vez mais refinados nos últimos anos, a procura por estes dados é crescente, o que leva às validações independentes em diferentes lugares do globo.

Para o Cerrado, Libonati et al. (2015) validaram anualmente (2005-2010) a C5.1 para uma área de 27.000 km², correspondente a cena Landsat 221_067, utilizando períodos entre junho e setembro. A coleção apresentou valores muito baixos de comissão¹ (menores que 15%), entretanto altos valores de omissão² (maiores que 30%). Consequentemente, ocorreram grandes subestimações dos totais de área queimada (menores que 0,69). A similaridade entre os pixels classificados e observados variou de 32% a 80%, sendo o ano mínimo discrepante dos demais e coincidente com o ano de máxima omissão. Adicionalmente, a maioria dos acertos (das omissões) é referente aos pixels com mais (menos) da metade de área queimada verdadeira.

Pereira et al. (2017) validaram a C6 no período com maior ocorrência de focos ativos em 2015 (setembro e outubro), sobre regiões do Cerrado correspondentes a 13 cenas Landsat, situadas na parte norte e sudeste do bioma, a saber: 218_072, 219_068, 219_070, 219_071, 219_072, 220_066, 220_067, 220_068, 221_067, 221_070, 221_071, 222_067 e 222_068. A coleção apresentou valores de comissão abaixo de 36% (com média de 15%) e valores de omissão acima de 21% (com média de 34%), subestimando os totais de área queimada (com média de 0,70). O máximo acerto de área queimada equivale a 74%, com média de 55%. De acordo com o intervalo de confiança de 95% calculado, espera-se que a média das omissões, comissões, dos acertos de queimada e vieses se enquadrem nos intervalos de 31–50%, 11–20%, 45–61% e 0,60–0,81 respectivamente, quando utilizados outros conjuntos de dados de referência. Três cenas mais ao sul do bioma, 218_072, 219_071 e 221_071, apresentaram os piores resultados nas medidas de avaliação de precisão analisadas, exceto 219_071 em comissão. Estas cenas também apresentaram menores totais de área queimada e alta frequência de cicatrizes pequenas.

Recentemente, Alves et al. (2018) compararam a qualidade de detecção da C5.1 com a C6 sobre um enclave de savana tropical com 4.342 km², no sudoeste da Amazônia brasileira. A validação avaliou o desempenho do mapeamento anual e sazonal de cicatrizes de fogo, no

¹ Comissão é qualquer porção de uma cicatriz que foi classificada equivocadamente pelo produto.

² Omissão é qualquer porção de uma cicatriz que não foi classificada pelo produto.

período de 2001 a 2016. No geral, a C6 do MCD64A1 conseguiu alcançar melhor desempenho em relação à C5.1, com i) clara diminuição das omissões, de 50% para 28% (entretanto, os valores anuais foram predominantemente mais elevados que estas médias), ii) maior eficácia na estimativa dos totais anuais e sazonais de área queimada, iii) melhor similaridade com os pixels de referência, e iv) manteve as baixas comissões alcançadas pela coleção anterior. Entretanto, as classes que, juntas, englobam o final de julho ao meado de outubro, influenciaram diretamente os resultados.

Do ponto de vista fitofisionômico, Zhu et al. (2017) validaram a C5.1 sobre seis tipos de vegetação em 12 regiões da Eurásia boreal, durante a temporada de queima de 2012, principalmente julho a setembro. No geral, o algoritmo subestimou as áreas queimadas. Observou-se grande deficiência do produto em detectar as áreas queimadas em terras cultivadas e florestas decíduas devido às pequenas queimadas (< 100 ha). Neste contexto, Hall et al. (2016) também mostraram que o MCD64A1 não conseguiu detectar cerca de 95% das áreas queimadas nas plantações russas, alertando sobre a preocupação em aplicar este produto no mapeamento de áreas queimadas associadas às queimas agrícolas. Apesar da C6 experimentar um aumento na área queimada mapeada, inclusive em áreas de agricultura, erros de comissão podem estar associados ao cultivo e colheita, ainda subestimando a extensão de queimadas nestas terras que envolvem alta complexidade de detecção (Giglio et al, 2018).

Todos os artigos mencionados anteriormente adotaram a metodologia de avaliação de precisão baseada em índices derivados da matriz de erros pixel a pixel, a partir da comparação do produto com mapas de referência de área queimada derivados de imagens com resolução espacial maior do que 30 m. Todos que analisaram o comportamento da(s) coleção(ões) temporalmente, concluíram que há uma variação dos resultados dependente das características espaciais das áreas queimadas em cada ano. Entretanto, de acordo com Padilla et al (2015), as variações anuais são normais e não representam uma instabilidade temporal do produto em ecossistemas como o Cerrado.

2.3. Caracterização das áreas queimadas do Cerrado

De acordo com Araújo et al. (2012), que investigaram o período 2002-2010, as ocorrências de queimadas no Cerrado se concentram na parte norte do bioma. Mataveli et al. (2018) corroboraram este resultado dentro do período 2002-2015, e ainda observaram que os focos mais intensos não necessariamente ocorrem onde as áreas queimadas e os focos ativos são mais concentrados. Relataram, também, que há uma diferença de 2 a 3 meses entre os registros de precipitação mínima e de máximo fogo ativo e área queimada. Adicionalmente,

os meses mais afetados pelas extensões das queimadas são agosto, setembro e outubro, quando a vegetação está bem condicionada aos efeitos da seca; já os anos mais críticos foram 2007 e 2010 em ambos os estudos. Com 5 anos de dados a mais, Mataveli et al. (2018) totalizaram uma área queimada 2,5 vezes maior que Araújo et al. (2012) (1.358.775 km² vs. 545.000 km²). Ambos os estudos utilizaram apenas as classificações altamente confiáveis do MCD45A1.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste no Cerrado, segundo maior bioma brasileiro e sul-americano, que ocupa uma área de pouco mais de 2 milhões de km² (cerca de 20% do território nacional). Estende-se pelo Brasil Central sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná, São Paulo e o Distrito Federal, de acordo com a delimitação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (IBGE, 2004). Engloba, integral ou parcialmente, 229 UCs das esferas estadual e federal e 95 Terras Indígenas (TIs) (Figura 1), de acordo com dados do Observatório de Unidades de Conservação do *World Wildlife Fund* (WWF) Brasil (WWF, 2018) e da Fundação Nacional do Índio (Funai, 2018) respectivamente. Considerado um *hotspot* mundial de biodiversidade e a savana com maior riqueza de espécies, compreende um mosaico de tipos de vegetação. Embora seja um bioma dependente do fogo, é bastante ameaçado pelo fogo antrópico (Prins et al., 1998).

A vegetação do Cerrado é típica de savanas, com um gradiente estrutural das fitofisionomias campestre, savânica e formação florestal. Ribeiro e Walter (1998) caracterizam estas fitofisionomias. Nas áreas campestres, há predomínio de gramíneas e herbáceas, com possíveis ocorrências de arbustos. As savanas possuem um extrato gramíneo, com uma densidade de árvores sem formação de um dossel contínuo. Já nas formações florestais, predominam dosséis de espécies arbóreas, com continuidade variável.

O clima da região é quente semiúmido, com uma estação seca pronunciada. A precipitação se concentra de outubro a abril, a chamada temporada de verão, com o acumulado mensal podendo alcançar 300 mm, enquanto de maio a setembro, o esperado mensal é quase nulo (Libonati et al., 2015). Savanas são altamente inflamáveis durante a estação seca e, portanto, mais sujeitas às queimadas (Durigan & Ratter, 2016).

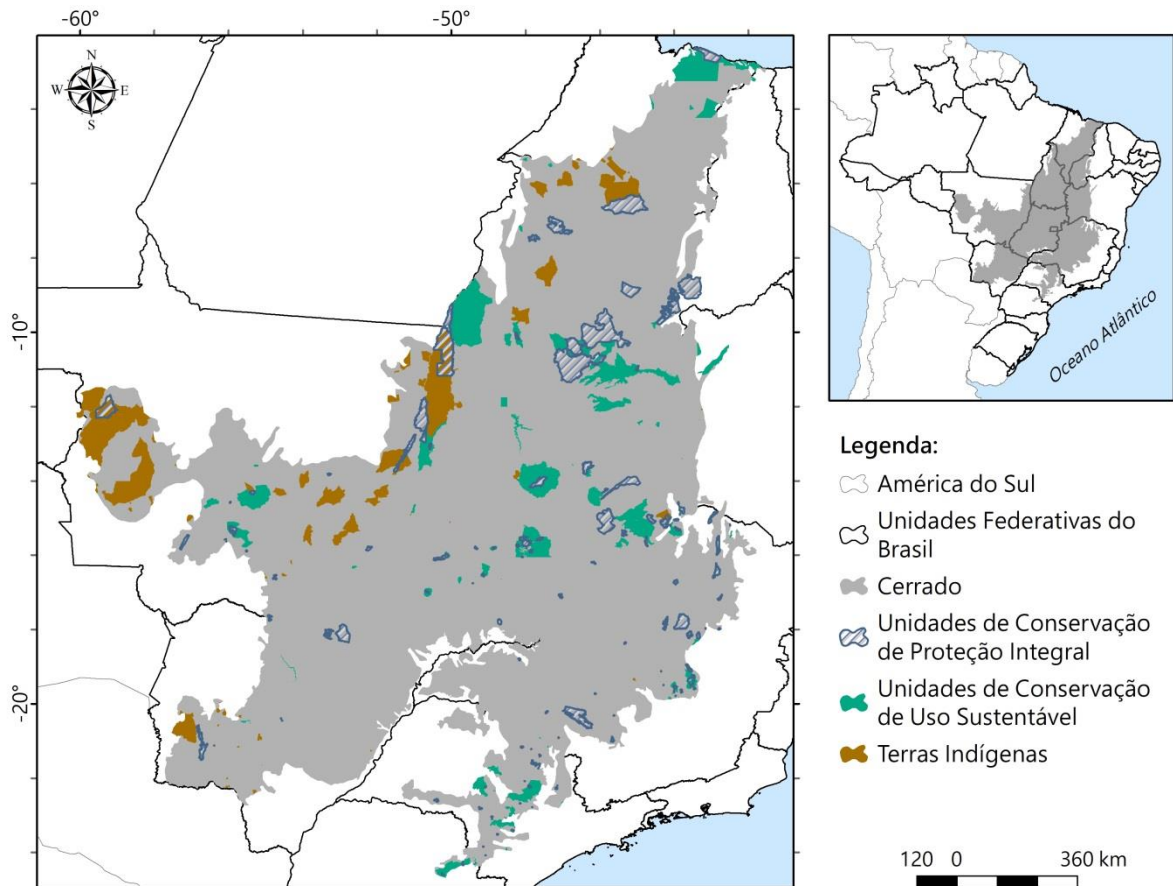


Figura 1. Localização da área de estudo e das áreas de proteção (unidades de conservação estaduais e federais e terras indígenas) que a compõe.

4. DADOS E MÉTODOS

4.1. Dados principais

4.1.1. Sensor MODIS

Lançado a bordo dos satélites Terra e Aqua em dezembro de 1999 e maio de 2002 respectivamente, o sensor MODIS pertence ao programa *Earth Observing System* (EOS) da NASA de observações contínuas das mudanças globais (superfície terrestre, atmosfera e oceanos). Trata-se de um espectrorradiômetro imageador de baixa resolução espacial, a qual varia entre 250 m e 1.000 m, composto por detectores capazes de fornecer imagens em 36 bandas espectrais entre o visível e o infravermelho termal (0,4–14,4 μm). O MODIS gera imagens que satisfazem os campos de estudos sobre atmosfera, superfície terrestre e oceano, com cobertura global quase diária e com bandas espectrais selecionadas para minimizar a absorção atmosférica. Uma síntese das especificações técnicas do instrumento é listada na Tabela 1 e as aplicações de cada banda são mostradas nas Tabelas 2 e 3. No mais, são gerados produtos de alto nível derivados das imagens brutas MODIS, voltados para a porção

continental da superfície terrestre (MODIS *Land*), dos quais 2 serão utilizados nesta pesquisa: MCD64A1 e MCD12Q1.

Tabela 1 – Características técnicas do sensor MODIS.

Órbita	Polar e heliossíncrona
Altitude	705 km
Horário de Passagem	Terra: 10h30 e 22h30 Aqua: 1h30 e 13h30
Alcance Espectral	0,4–14,4 μm
Cobertura espectral	$\pm 55^\circ$ Faixa – 2.330 km
Resolução espacial	Bandas 1 e 2: 250 m Bandas 3–7: 500 m Bandas 8–36: 1.000 m
Resolução temporal	1 dia: a norte da latitude 30° 2 dias: latitudes inferiores a 30°
Resolução radiométrica	12 bits

Fonte: Adaptado de Latorre et al. (2003).

Tabela 2 – Características espectrais das bandas 1-19 do sensor MODIS.

Banda	Comprimento de onda (μm)		Uso primário
	Refletido	Emitido	
1	0,620–0,670		Transformação absoluta da superfície terrestre; Clorofila da vegetação
2	0,841–0,876		Quantidade de nuvem; Transformação da vegetação da superfície terrestre
3	0,459–0,479		Diferenças solo/vegetação
4	0,545–0,565		Vegetação verde
5	1,230–1,250		Diferenças folha/dossel
6	1,628–1,652		Diferenças neve/nuvem
7	2,105–2,155		Propriedades da nuvem e terrestres
8	0,405–0,420		Clorofila
9	0,438–0,448		Clorofila

10	0,483–0,493		Clorofila
11	0,526–0,536		Clorofila
12	0,546–0,556		Sedimentos
13	0,662–0,672		Atmosfera; Sedimentos
14	0,673–0,683		Fluorescência da clorofila
15	0,743–0,753		Propriedades do aerossol
16	0,862–0,877		Propriedades atmosféricas e do aerossol
17	0,890–0,920		Propriedades atmosféricas e da nuvem
18	0,931–0,941		Propriedades atmosféricas e da nuvem
19	0,915–0,965		Propriedades atmosféricas e da nuvem

Fonte: Adaptado de USGS (2014).

Tabela 3 – Características espectrais das bandas 20-36 do sensor MODIS.

Banda	Comprimento de onda (µm)		Uso primário
	Refletido	Emitido	
20		3,660–3,840	Temperatura da superfície do mar
21		3,929–3,989	Incêndios florestais e vulcões
22		3,929–3,989	Temperatura da nuvem e da superfície
23		4,020–4,080	Temperatura da nuvem e da superfície
24		4,433–4,498	Fração de nuvem; Temperatura da troposfera
25		4,482–4,549	Fração de nuvem; Temperatura da troposfera
26	1,360–1,390		Fração de nuvem (<i>cirrus</i> fina); Temperatura da troposfera
27		6,535–6,895	Umidade da média da troposfera
28		7,175–7,475	Umidade da troposfera superior
29		8,400–8,700	Temperatura da superfície
30		9,580–9,880	Ozônio total
31		10,780–11,280	Temperatura da nuvem e da superfície; Incêndios florestais e vulcões
32		11,770–12,270	Altura da nuvem; Incêndios florestais e

			vulcões; Temperatura da superfície
33		13,185–13,485	Fração de nuvem; Altura da nuvem
34		13,485–13,785	Fração de nuvem; Altura da nuvem
35		13,785–14,085	Fração de nuvem; Altura da nuvem
36		14,085–14,385	Fração de nuvem; Altura da nuvem

Fonte: Adaptado de USGS (2014).

4.1.2. Produtos de área queimada MODIS

O MCD64A1 *Direct Broadcast Monthly Burned Area Product* é um produto global mensal com resolução espacial de 500 m, fornecido em *tiles* (coordenadas h, v) de tamanho aproximado $10^\circ \times 10^\circ$. Em extensão HDF, possui 5 camadas de dados armazenadas separadamente, nomeadas ‘Data da queima’, ‘Incerteza na data da queima’, ‘Garantia de qualidade (QA)’, ‘Primeiro dia’ e ‘Último dia’. É disponibilizado pela Universidade de Maryland via FTP (<ftp://fuoco.geog.umd.edu/db/MCD64A1>) e pela NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), com dados desde novembro de 2000. De grande importância, é utilizado na quarta geração do inventário de emissões de gases de efeito estufa por queimadas (*Global Fire Emissions Database - GFED4*) (Giglio et al., 2013). Os produtos mensais de área queimada do sensor MODIS são mapas temáticos das cicatrizes de queimadas, produzidos a partir da classificação de imagens obtidas por sensoriamento remoto, que por sua vez fornece dados diários espacialmente contíguos de áreas extensas. Devido à frequência e abrangência dos dados de entrada, os produtos não possuem resolução espacial detalhada da superfície.

Os algoritmos de detecção da C5.1 e C6 são descritos por Giglio et al. (2009; 2018) e utilizam reflectâncias de 2 intervalos do infravermelho de ondas curtas (SWIR1-banda 5 e SWIR2-banda 7 do sensor MODIS), juntamente com uma medida de textura temporal e espacial. Os algoritmos também utilizam focos ativos MODIS/Terra e Aqua 1 km como ponto de partida para identificar pixels de treinamento, representativos de queimada e não queimada. Os dados de entrada consistem nos produtos diários MODIS 500 m *Level 2G* Terra (MOD09GHK) e/ou AQUA (MYD09GHK) de reflectância diária da superfície corrigidos atmosféricamente, MODIS 1 km *Level 3* Terra (MOD14A1) e/ou AQUA (MYD14A1) de focos ativos diários, e o produto anual MODIS 500 m *Level 3* (MCD12Q1) de cobertura da terra.

O índice espectral utilizado como o indicador primário dos algoritmos para identificar áreas queimadas é definido como a diferença entre SWIR1 e SWIR2, normalizada pela soma. Após a queimada, este índice mostra uma diminuição abrupta no seu valor. A abordagem geral é produzir imagens compostas, resumindo as mudanças persistentes na série temporal do índice e, em seguida, usar informações espaciais e temporais de foco ativo para guiar a caracterização estatística da mudança relacionada à queima e não queima. O que difere os algoritmos, basicamente, são os limiares de decisão e a coleção dos dados de entrada MODIS.

Periodicamente, é realizado um reprocessamento nos dados MODIS para incluir melhor calibração e conseqüente aprimoramento de todos os produtos derivados das imagens do sensor. Esta prática dá origem às novas versões refinadas dos produtos, chamadas de coleções. O reprocessamento é um requisito fundamental para a produção de conjuntos de dados consistentes e de qualidade científica, adequados para o monitoramento a longo prazo. As melhorias na C6 incluíram:

- O produto é gerado usando, como dados de entrada, a reflectância da superfície e os focos ativos da C6 do MODIS;
- Melhoria no algoritmo de detecção;
- Melhor sensibilidade a pequenas queimadas;
- Redução das omissões;
- Redução das áreas não mapeadas;
- Redução substancial na incerteza temporal;
- Maior cobertura do produto.

O produto pioneiro de área queimada mensal desenvolvido pela NASA usando dados derivados do sensor MODIS, o MCD45A1, teve sua vida útil de 2008 a 2017, produzindo dados de 2000 a 2017 somente até a C5.1. O algoritmo é baseado em um modelo que incorpora efeitos de reflectância direcional com a mudança temporal da reflectância da superfície (Roy et al., 2008). Além da data estimada da queima, fornece uma camada de controle de qualidade da detecção, que informa o nível de confiabilidade da classificação (QA) do alto para o baixo (QA de 1–4), além das queimadas em agricultura (QA = 5). Devido aos custos operacionais de manter dois códigos distintos, a equipe científica de incêndios MODIS decidiu vigorar somente a nova C6 do MCD64A1, substituindo oficialmente a antiga C5.1 e o MCD45A1. Desde abril de 2018, é o único produto processado pela NASA. A decisão foi conduzida com base em resultados anteriores de avaliação dos produtos.

4.1.3. Dado de referência de área queimada – Landsat/INPE

Os dados de referência são cicatrizes de área queimada geradas a partir de imagens de sensores de média ou alta resolução espacial, que permitem maior detalhamento da superfície, assumidos como representação da realidade. Os resultados da avaliação da qualidade dos produtos de baixa resolução dependem não só do algoritmo classificador, mas também dos dados utilizados como referência. Por isso, é fundamental que sejam confiáveis e englobem o mesmo período de estudo. Tais dados são geralmente feitos por diferentes grupos, utilizando diferentes técnicas (i.e. dados *in situ* ou dados de sensoriamento remoto), distintos métodos de classificação (classificação supervisionada e não-supervisionada, inspeção visual etc) e ainda com resoluções temporais e espaciais distintas. Porém, limitam-se a poucas e específicas regiões devido à escala local.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolve mapas de cicatrizes de queimada para o Cerrado, organizados por cena Landsat (representada pela órbita_ponto do satélite) em formato vetorial, de 2001 a 2017, os quais foram utilizados como os dados de referência desta pesquisa. No total, a grade é composta por 113 cenas e o acesso dos dados é livre no endereço eletrônico do Programa Queimadas (<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/>). O Programa de Monitoramento de Queimadas do INPE utiliza o algoritmo proposto por Melchiori et al. (2014) para realizar o mapeamento automático. Os dados de entrada são imagens multiespectrais de satélites da série Landsat, que possui resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias. São utilizadas imagens do sensor *Thematic Mapper/Landsat-5* (TM) de 2001 a 2012 e do sensor *Operational Land Imager/Landsat-8* (OLI) desde 2013.

O método de classificação consiste na aplicação dos índices espectrais *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Normalized Burn Ratio Long SWIR Variation* (NBRL), que utilizam a reflectância no infravermelho próximo (cerca de 0,76–0,90 μm para o Landsat-5 e 0,85–0,88 μm para Landsat-8), no vermelho (cerca de 0,63–0,69 μm para Landsat-5 e 0,64–0,67 μm para Landsat-8) e no SWIR (cerca de 2,08–2,35 μm para Landsat-5 e 2,11–2,29 μm para Landsat-8), e na taxa de mudança entre imagens consecutivas (CRNDVI e CRNBRL respectivamente) definida como a razão entre a diferença do índice nas datas inicial e final e o módulo do índice na data inicial. Para evitar *outliers*, um limiar de diferença temporal de NBRL foi aplicado (DNBRL). O pixel será classificado como queimada, caso as três condições seguintes forem obedecidas:

- i) $\text{CRNDVI} \geq 0,45$ para TM e $\text{CRNDVI} \geq 0,35$ para OLI;
- ii) $\text{CRNBRL} \geq 0,5$;

iii) $DNBRL \geq 0,10$ para TM e $DNBRL \geq 0,06$ para OLI.

Apesar das potenciais advertências associadas a um conjunto de dados automatizados, este é o registro mais abrangente de cicatrizes de queimadas no Brasil/Cerrado, de acordo com nosso conhecimento. Para menores efeitos, uma auditoria destes dados precede a divulgação.

4.2. Dados auxiliares

4.2.1. Focos ativos

Os focos ativos detectados a partir de imagens de satélite fornecem informações sobre a ocorrência de fogo na vegetação. Representam o centro de um pixel sinalizado pelo algoritmo como contendo pelo menos uma frente de fogo, a partir de altas temperaturas registradas por bandas termais, que geralmente saturam o sensor. Neste trabalho, os dados de focos ativos serão correlacionados com as queimadas mapeadas pelas coleções do MCD64A1.

Para isso, serão utilizados dados do sensor *Visible Infrared Imager Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo do satélite *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (Suomi-NPP) 375 m, denominado *VIIRS I Band 375 m Active Fire Product* (VNP14IMGTDL; Schroeder et al., 2014), que não pertence à composição dos algoritmos das coleções do MCD64A1. Esta escolha partiu da premissa de não comprometer os resultados da correlação com dados dependentes (no caso, MODIS/Aqua e Terra 1 km), além da maior resolução espacial que melhora a detecção de incêndios em pequenas áreas e à noite. O algoritmo utiliza todas as 5 bandas VIIRS (I1 0,6–0,68 μm , I2 0,85–0,88 μm , I3 1,58–1,64 μm , I4 3,55–3,93 μm e I5 10,5–12,4 μm), sendo I4 e I5 especificamente para detecção do fogo, e I1–I3 no suporte à discriminação de nuvens, raios solares e corpos d'água. O produto possui cobertura temporal de 20 de janeiro de 2012 até o presente e está disponível em: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>.

4.2.2. Mapa de uso e cobertura do solo

A cobertura terrestre desempenha um papel importante no clima e na biogeoquímica do sistema terrestre (USGS, 2012). O mapa de uso e cobertura do solo indica como o espaço está sendo ocupado e a sua modificação ao longo do tempo. O produto MODIS *Land Cover* (MCD12Q1) 500 m C6 *Type 1*, adquirido do endereço eletrônico da NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), fornece a caracterização da cobertura global terrestre anualmente, com base na classificação do *International Geosphere Biosphere Programme* (IGBP). O esquema identifica 17 classes de cobertura da terra, das quais 11 são

de vegetações naturais (*'Evergreen Needleleaf (Broadleaf) Forests'*, *'Deciduous Needleleaf (Broadleaf) Forests'*, *'Mixed Forests'*, *'Closed (Open) Shrublands'*, *'(Woody) Savannas'*, *'Grasslands'* e *'Permanent Wetlands'*), 3 são de terras desenvolvidas e mosaicos (*'Croplands'*, *'Cropland/Natural Vegetation Mosaics'* e *'Barren'*) e 3 são de superfícies não vegetadas (*'Urban and Built-up Lands'*, *'Permanent Snow and Ice'* e *'Water Bodies'*). Sobre a área de estudo, somente *'Deciduous Needleleaf Forests'* e *'Permanent Snow and Ice'* não são encontradas, como pode ser visto na Figura 2. Este dado será utilizado para identificação das proporções das regiões do Cerrado, segmentadas por cenas Landsat, com uso do solo. O MCD12Q1 foi escolhido i) devido a sua resolução espacial, ii) por atender investigações científicas sobre o estado atual da cobertura do solo e iii) por também ter o sensor MODIS como fonte.

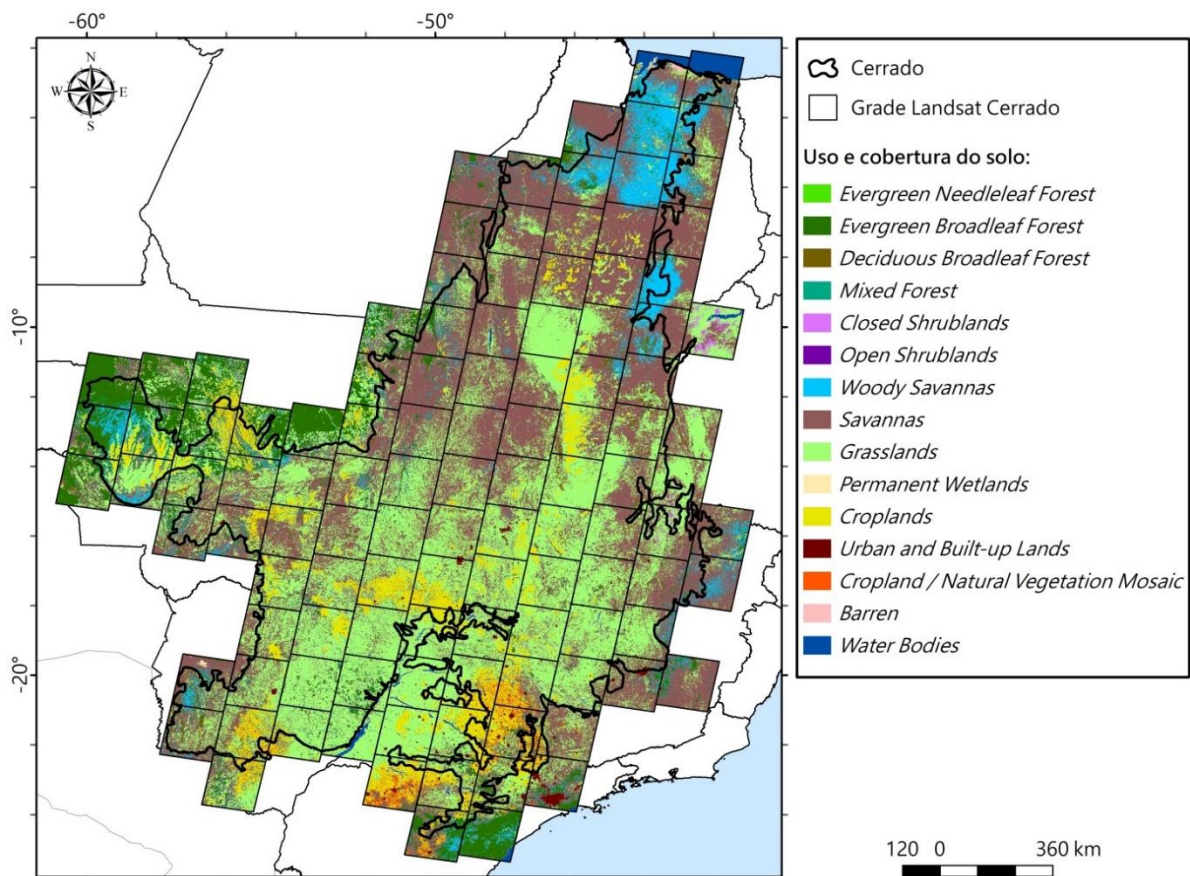


Figura 2. Mapa de uso e cobertura do solo do Cerrado, de acordo com o produto MODIS MCD12Q1-IGBP C6 500 m.

A C5.1 do MCD12Q1, coleção anterior, é gerada a partir de um algoritmo de classificação supervisionada, baseado em um conjunto de 10 árvores de decisões, a partir de pixels amostrais espalhados por todo o globo, representativos de diferentes ecologias e

geografias (Friedl et al., 2002, 2010). Os recursos de entrada incluem informações espectrais e temporais das bandas MODIS 1–7, índice de vegetação (*Enhanced Vegetation Index* - EVI), produto MODIS de temperatura da superfície terrestre, além de dados MODIS ajustados de refletância ao nadir. Após os resultados de saída da árvore de decisão, refinamentos de pós-processamento são aplicados para resolver as limitações associadas a um algoritmo global e criar o produto final. O objetivo é corrigir vieses causados por propriedades das amostras de treinamento, confusão espectral-temporal e reduzir a variabilidade anual das classificações.

Para C6, versão atual e utilizada neste trabalho, algumas mudanças foram aplicadas no algoritmo, entretanto não houve um artigo publicado sobre o assunto até o fechamento deste documento. Sulla-Menashe e Friedl (2018, *MCD12Q1 C6 User's Guide*) enumeraram, resumidamente, as alterações realizadas, que incluem mudança substancial no algoritmo que pré-processa e classifica os dados e nos recursos de entrada usados nas classificações.

4.2.3. Áreas de proteção ambiental

A geolocalização de (partes das) áreas protegidas (APs) compreendidas no Cerrado, sendo UCs e TIs, completa o conjunto de dados para análise do impacto do fogo no bioma. Os arquivos estão em formato *shapefile*, com os polígonos representativos das delimitações destas áreas de acordo com os limites propostos pelo Observatório de Unidades de Conservação do WWF (2018) e pela Funai (2017), disponíveis em: <http://observatorio.wwf.org.br/mapa/> e <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>. Os dados incluem UCs de proteção integral (UCPI, 125 unidades em 60.191 km²) e de uso sustentável (UCUS, 104 unidades em 106.611 km²), além de todas as TIs (95 terras em 96.576 km²), totalizando 324 áreas distintas em 263.378 km² (Figura 1). Pode-se, assim, conhecer quais áreas protegidas foram mais afetadas pelas queimadas nestes 15 anos e fornecer informação para reformularem políticas de fiscalização, prevenção, mitigação e combate ao fogo.

4.3. Métodos

A metodologia utilizada para elaboração desta pesquisa ficou organizada em duas seções: i) validação das coleções do produto de área queimada de baixa resolução espacial MCD64A1 (**verificação do produto**) e ii) caracterização espaço-temporal do regime de fogo no Cerrado (**aplicação do produto**).

Na seção ‘verificação do produto’ (item 4.3.1), é avaliada a qualidade das estimativas de áreas queimadas, descrito todo conceito e procedimento da validação desde o tratamento dos dados, conforme as etapas abaixo:

(item 4.3.1.1) Pré-processamento dos dados;

(item 4.3.1.2) Validação das coleções;

(item 4.3.1.3) Análise regional e temporal com focos ativos;

(item 4.3.1.4) Relação entre uso do solo e avaliação de área queimada;

A seção ‘aplicação do produto’ (item 4.3.2) consiste em utilizar a melhor coleção do produto de área queimada na análise da dinâmica do fogo no Cerrado.

(item 4.3.2.1) Caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado (2003-2017);

4.3.1. Verificação do produto

Nesta seção, realiza-se a validação das coleções 5.1 e 6 do produto MCD64A1 para estimar as incertezas associadas ao mapeamento automático. Aqui, serão aplicadas técnicas de estatística descritiva e inferencial (matriz de erros, gráfico de caixas e correlação).

Gráfico de caixas

Representação gráfica da distribuição dos dados, que permite uma melhor visualização/extração de informações. Com os valores da variável ordenados do menor para o maior, é possível observar os dados em subconjuntos de 25% (primeiro quartil), 50% (segundo quartil ou mediana) e 75% (terceiro quartil) da distribuição. Os valores extremos inferior e superior também podem ser visualizados, exceto os valores discrepantes (*outliers*). Por sua vez, um *outlier* representa um valor com grande afastamento dos demais valores da série.

Correlação de Kendall

Verifica se existe alguma relação entre pares de variáveis independentes e qual o grau de intensidade desta relação, a partir de um diagrama de dispersão (X_i , Y_i). Quando duas variáveis estão ligadas por uma relação estatística, dizemos que existe correlação entre elas. Os valores da correlação pertencem ao intervalo $[-1, 1]$, sendo mais fortes quanto mais próximos de $|1|$.

Dentre os métodos existentes, o Coeficiente não-paramétrico de Kendall (τ) é um teste livre de distribuição e robusto contra ruído, em contraste com os métodos tradicionais baseados em mínimos quadrados comuns. Kendall verifica a hipótese nula (H_0) de que não há correlação entre as variáveis, ou a hipótese alternativa (H_1) de que existe correlação entre as variáveis.

Matriz de erros: Tabela de contingência

A verificação de previsões é um processo de avaliação da qualidade das previsões. Neste caso, será estudada a qualidade das classificações das coleções, comparando-as com os dados Landsat (referência). Bastante aplicada nas Ciências Atmosféricas, envolve medidas da concordância entre uma classificação (MCD64A1) e a sua observação correspondente (Landsat).

A tabela de contingência é uma técnica estatística voltada para resultados não-probabilísticos, ou seja, que não possuem incertezas, da qual serão derivadas as equações de validação (Wilks, 2006). Organiza e corresponde, um a um, os valores das combinações possíveis de pares de classificação/observação, como esquematizado na Tabela 4. As possibilidades da classificação são iguais às da observação que, neste caso de queimadas, trata-se do mais simples possível, o dicotômico (2×2) ou 'sim ou não'. As observações estão dispostas nas colunas e representam o mapa de referência de média resolução espacial; por sua vez, as linhas compõem as classificações que são as coleções de área queimada. Sendo assim, 'a' ('d') representa a interseção das áreas sobre as quais o evento (não) foi classificado e (não) ocorreu, denominada acerto de (não) queimada; 'b' representa a área sobre a qual o evento foi classificado, mas não ocorreu, chamada comissão; e 'c' é a área sobre a qual o evento ocorreu, mas não foi classificado, chamada omissão. Os pixels classificados corretamente ocupam a diagonal principal da tabela, enquanto a diagonal secundária é ocupada por elementos erroneamente classificados. Os totais marginais das linhas e colunas representam, simplesmente, a contagem de acerto ou erro de classificação ou de observação.

Tabela 4 – Tabela de contingência 2 x 2 para eventos de queimada.

Queimou?		Mapa de referência		
		Sim	Não	Total
Produto de área queimada	Sim	a	b	a + b
	Não	c	d	c + d
	Total	a + c	b + d	a + b + c + d

4.3.1.1. Pré-processamento dos dados

Os dados mensais do MCD64A1 requerem pré-processamento, uma vez que há a necessidade da realização de um mosaico (.tif) com os *tiles* (.hdf) que compõem a área de estudo (h12, v09 a h13, v11). Além disso, as imagens foram reprojetaadas para coordenadas geográficas e reamostradas pelo método do vizinho mais próximo, que não altera o valor do pixel, com o auxílio da ferramenta livre “MODIS *Reprojection Tools*” (MRT, https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool). Somente a camada ‘data da queima’ foi utilizada. Um total de 1.080 imagens foi processado (6 *tiles* x 12 meses x 15 anos).

4.3.1.2. Validação das coleções

Uma série de procedimentos de controle de qualidade que removem registros de precisão reduzida foi aplicada para garantir a consistência de todas as amostras de cicatrizes de queimada. A priori, avaliaram-se as imagens que deram origem aos dados de referência e, a partir delas, definiram-se os períodos a serem validados. Os seguintes critérios para seleção de cicatrizes foram estabelecidos, a fim de minimizarmos os erros durante a avaliação de precisão:

- i) Intervalo (diferença temporal) de 16 dias entre imagens consecutivas, mínimo possível para imagens Landsat, a fim de evitar a atenuação ou eliminação do sinal espectral das queimadas, principalmente em regiões de savana (Pereira, 2003);
- ii) Meses de junho a novembro, que compreendem o período seco e o início do período úmido no Cerrado;
- iii) Cobertura de nuvens igual ou inferior a 10%, para evitar o mascaramento das cicatrizes;
- iv) Análise espacial da concentração de nuvens em imagens pré e pós-fogo onde havia cicatrizes, a fim de evitar erros de comissão.

Após a filtragem, 84 cenas Landsat que cobrem o Cerrado puderam ser validadas para 2015 (Figura 3), que foi um dos anos com maior registro de focos ativos no Cerrado (Pereira et al., 2017) (os meses referentes às datas selecionadas das cicatrizes podem ser vistos na Tabela A1 do Anexo). As demais cenas foram descartadas por não se enquadrarem em todos os critérios, comprometendo a qualidade dos resultados. O período inicial e final de validação foi ampliado por mais dois dias devido à incerteza da data de queima (Giglio et al., 2018) e apenas cicatrizes com área igual ou superior a 25 ha (área mínima de um pixel MCD64A1) foram consideradas. Em seguida, iniciou-se o processo de validação seguindo a metodologia da literatura, que utiliza a tabela de contingência para extrair as medidas de avaliação de precisão. Foram utilizadas as 4 medidas a seguir:

- Índice Crítico de Acerto (ICA, em inglês *Threat Score*), definido como a fração de pixels queimados classificados corretamente e as ocasiões em que a queimada foi classificada e observada:

$$ICA = \frac{a}{a+b+c} \quad (1)$$

- Erro de Omissão (EO, em inglês *Omission Error*), definido como a fração de pixels queimados no mapa de referência que não foram classificados como tal no produto de área queimada:

$$EO = \frac{c}{a+c} \quad (2)$$

- Erro de Comissão (EC, em inglês *Commission Error*), definido como a fração de pixels classificados como queimados no produto de área queimada que não pertencem a essa classe, de acordo com o mapa de referência:

$$EC = \frac{b}{a+b} \quad (3)$$

- Viés (V, em inglês *Bias*), definido como a relação entre o número de pixels classificados como queimados no produto de área queimada e o número de pixels queimados no mapa de referência:

$$V = \frac{a+b}{a+c} \quad (4)$$

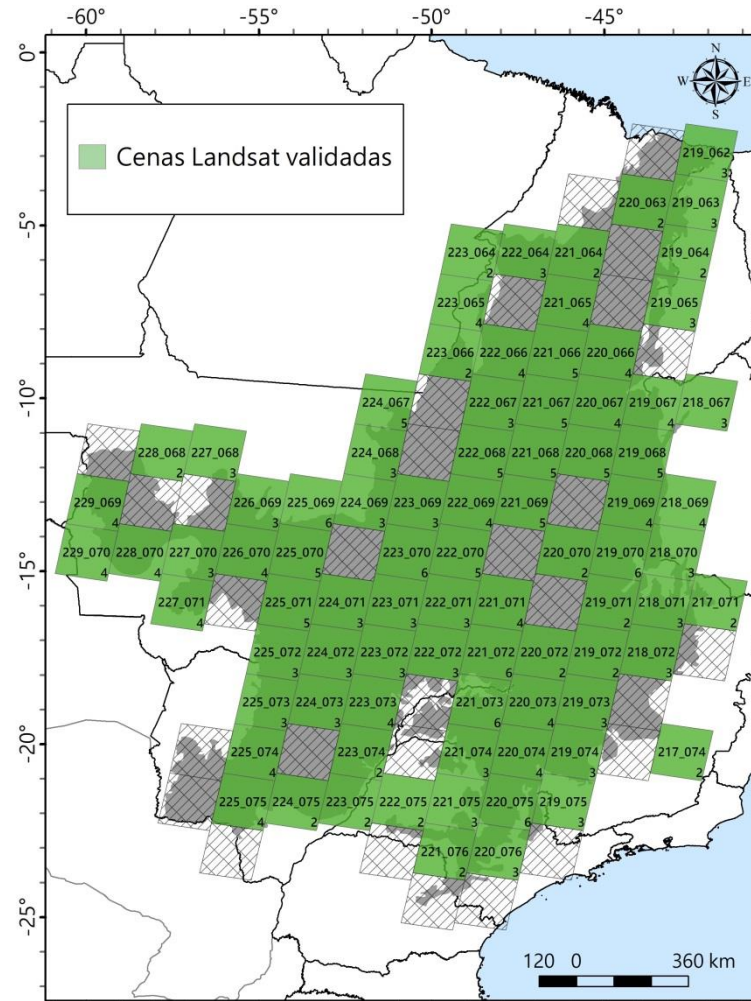


Figura 3. Grade Landsat que cobre o Cerrado, composta por 113 cenas, das quais 84 foram possíveis de validar. Os números centrais representam a órbita_ponto da cena e os subscritos representam a quantidade de imagens que compuseram o período de validação.

O ICA é um verificador para eventos raros, pois considera apenas os acertos de queimada. Os erros EO e EC fornecem informação sobre a confiabilidade e o poder de discriminação do produto desenvolvido, e possuem uma orientação negativa, de modo que os menores valores são preferíveis. O V não fornece nenhuma informação sobre a correspondência entre as classificações e observações do evento, é simplesmente a fração do número de classificações ‘sim’ e do número de observações ‘sim’. Uma classificação neutra apresenta $V = 1$, enquanto $V < 1$ ($V > 1$) indica que o evento foi classificado menos (mais) vezes do que observado, ou seja, subestimado (superestimado).

Entretanto, a teoria acima descrita não leva em consideração que existe uma diferença de resolução espacial entre o sensor utilizado para a classificação e o sensor utilizado para gerar os dados de referência. A Figura 4 exemplifica o problema. Dois mapas dicotômicos cobrindo a mesma área, sendo o primeiro derivado de um sensor de baixa resolução (painel

superior esquerdo) e o outro derivado de um sensor de alta resolução espacial (painel superior direito). O mapa feito com o sensor de baixa resolução possui pixels que cobrem áreas mistas (queimadas e não queimadas - painel inferior). Conseqüentemente, dependendo da classe em que este pixel será classificado, levará a erros de omissão ou comissão. Isso porque a tabela de contingência tradicional, como mostrada anteriormente, dá pesos iguais a cada pixel, independente da proporção de cada classe presente neste pixel. Para eliminar EO e EC que seriam gerados pela tabela de contingência tradicional, é preciso que as medidas sejam calculadas de acordo com a técnica *fuzzy* desenvolvida por Binaghi et al. (1999). Neste caso, a concordância/discordância entre os dados de referência (30 m) e os dados classificados (500 m) é calculada levando em consideração a proporção de área queimada/não queimada dos dados de referência que se encontra em cada pixel de 500 m. Por exemplo, se um pixel é classificado como queimado e de acordo com os dados de referência possui 70% de sua área como queimada verdadeiramente, então este pixel terá uma proporção de 0,7 como acerto de queimada e uma proporção de 0,3 como erro de comissão. No caso tradicional, este pixel seria totalmente classificado como acerto de queimada (proporção 1), sem nenhum erro de comissão (proporção 0).

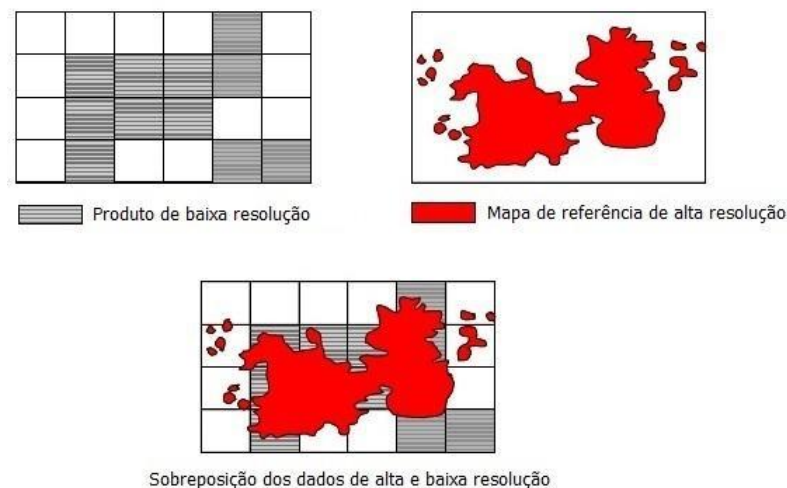


Figura 4. Dois mapas temáticos dicotômicos típicos cobrindo a mesma área: um derivado de imagens de baixa resolução espacial (superior esquerdo) e o outro, de alta resolução espacial (superior direito). Embaixo, é mostrada a sobreposição de ambos os mapas. Fonte: Adaptado de Boschetti (2005).

A análise e interpretação dos resultados da validação das cenas do Cerrado fornecerá informação sobre a distribuição espacial e temporal da acurácia das coleções de área queimada. Tal procedimento permitirá analisar a distribuição espaço-temporal das áreas queimadas sob o ponto de vista das incertezas.

4.3.1.3. Análise regional e temporal com focos ativos

Uma abordagem regional apoiada em informações sobre focos ativos é utilizada aqui, para verificar a consistência espacial e temporal da variabilidade das coleções de área queimada, como em estudos anteriores (Boschetti et al., 2010; Giglio et al., 2010). Dados de focos ativos fornecem uma indicação direta e confiável da ocorrência de queimadas, geralmente recuperada com baixas taxas de falsos alarmes (Giglio et al., 2016; Schroeder et al., 2008). Embora a comparação entre área queimada e fogo ativo não seja direta devido às discrepâncias significativas entre os dois parâmetros, esse tipo de comparação fornece informações úteis sobre o desempenho do algoritmo em grandes áreas e períodos em que não há outros dados de referência disponíveis para avaliação de exatidão (Humber et al., 2018). Esse é o caso das cicatrizes de referência Landsat geradas pelo INPE, que são restritas à estação de incêndios.

Para isto, τ foi aplicado para medir a correlação anual entre as coleções MCD64A1 e os focos ativos VIIRS a partir dos totais anuais em cada célula de grade de 25 x 25 km sobre o Cerrado, para cada ano de 2013 a 2016, a um nível de significância de 0,05.

4.3.1.4. Relação entre uso do solo e avaliação de área queimada

Por fim, realizamos uma análise espacial em escala regional com o objetivo de compreender as relações entre as características de área queimada (principais padrões e incertezas) e a influência humana.

Para levar em conta o impacto humano, categorizamos cada uma das 84 cenas Landsat de acordo com um grau de antropização, usando um agrupamento conceitual. Nesta abordagem, 3 níveis diferentes foram categorizados de acordo com a intensidade do uso do solo (IUS), ocupando entre 0–50% (baixa IUS), 51–75% (média IUS) e 76–100% (alta IUS) das cenas Landsat. O conceito de IUS foi baseado na área de três classes de uso do solo do MCD12Q1-IGBP C6 em 2015: “*Grasslands*”, “*Croplands*” e “*Cropland/Natural Vegetation Mosaic*”. De acordo com a classificação do IGBP (Loveland e Belward, 1997), a classe “*Grasslands*” é dominada por plantas herbáceas anuais (< 2 m); a classe “*Croplands*” se refere às áreas com pelo menos 60% de terras cultivadas; e a classe “*Cropland/Natural Vegetation Mosaic*” são mosaicos de cultivo em pequena escala, com 40–60% de árvores naturais, arbustos ou vegetação herbácea.

4.3.2. Aplicação do produto

Nesta etapa, a caracterização espaço-temporal do regime de fogo será abordada no período de 2003 a 2017, utilizando a coleção que apresentou melhor qualidade de detecção na etapa de validação. A série temporal foi elaborada de modo a englobar o máximo de anos completos com dados homogêneos, isto é, que o MCD64A1 foi gerado da combinação de dados MODIS dos satélites Terra e Aqua. A caracterização espacial foi conduzida sobre uma grade de 25 x 25 km. Serão aplicadas técnicas de estatística descritiva e inferencial (acumulados, média, anomalia padronizada) e análises espaciais por densidade e *clusters*.

Anomalia padronizada

A anomalia padronizada (Z), que corresponde à anomalia de uma variável dividida pelo seu desvio padrão, permite a análise anual e espacial de ocorrências extremas de tal variável. Aplicou-se para o acumulado anual de área queimada e na análise célula-a-célula no período estudado, sendo definida como:

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{dp} \quad (5)$$

onde X_i é o total de área queimada no ano para o qual se quer calcular a anomalia, \bar{X} é a média dos 15 anos estudados e dp é o desvio padrão.

Análise de clusters

A caracterização espaço-temporal das queimadas no Cerrado prosseguiu na análise de *clusters* para definir piro-regiões, que consistiu em uma classificação não-supervisionada pelo método *k-means*, para identificar regiões homogêneas ou com histórico semelhante de detecção de área queimada (regime de fogo). No final, cada classe teve uma sazonalidade diferente, portanto uma piro-região diferente. Para tal análise, foram utilizados os dados mensais de área queimada para o período de 2003 a 2017. Calculamos a área queimada normalizada (AQN) em uma grade de 25 x 25 km, definida como o quociente entre o total mensal de área queimada em cada célula da grade e a área correspondente da célula. A identificação de piro-regiões de áreas queimadas foi utilizada por Sousa et al. (2015) ao desenvolverem projeções para futuros regimes de fogo na Península Ibérica, além de Trigo et al. (2013) para conhecerem a variabilidade espacial e temporal da área queimada em toda a

Península Ibérica e construir modelos estatísticos a fim de reproduzir a variabilidade interanual das queimadas.

4.3.2.1. Caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado (2003 a 2017)

As seguintes questões serão respondidas:

- i) Análise temporal da área queimada no bioma Cerrado:
 - a. Totais anuais - variabilidade interanual. Questões a serem respondidas: Qual o total anual de área queimada no Cerrado? Qual a média anual de área queimada no Cerrado? Quais anos extremos no período? Qual a relação entre o clima e a variabilidade anual do fogo no Cerrado?
 - b. Totais mensais - variabilidade intra-anual. Questões a serem respondidas: Qual a média mensal de área queimada no Cerrado? Qual o regime sazonal do fogo? Qual a relação entre o clima e a variabilidade sazonal do fogo no Cerrado?
- ii) Análise espacial da área queimada no bioma Cerrado:
 - a. Questões a serem respondidas: Quais regiões são mais propensas ao fogo no Cerrado? Como a distribuição das áreas queimadas se relaciona com a presença humana? Quais áreas protegidas são mais afetadas pelo fogo? Quais as incertezas associadas às estimativas de área queimada no Cerrado?

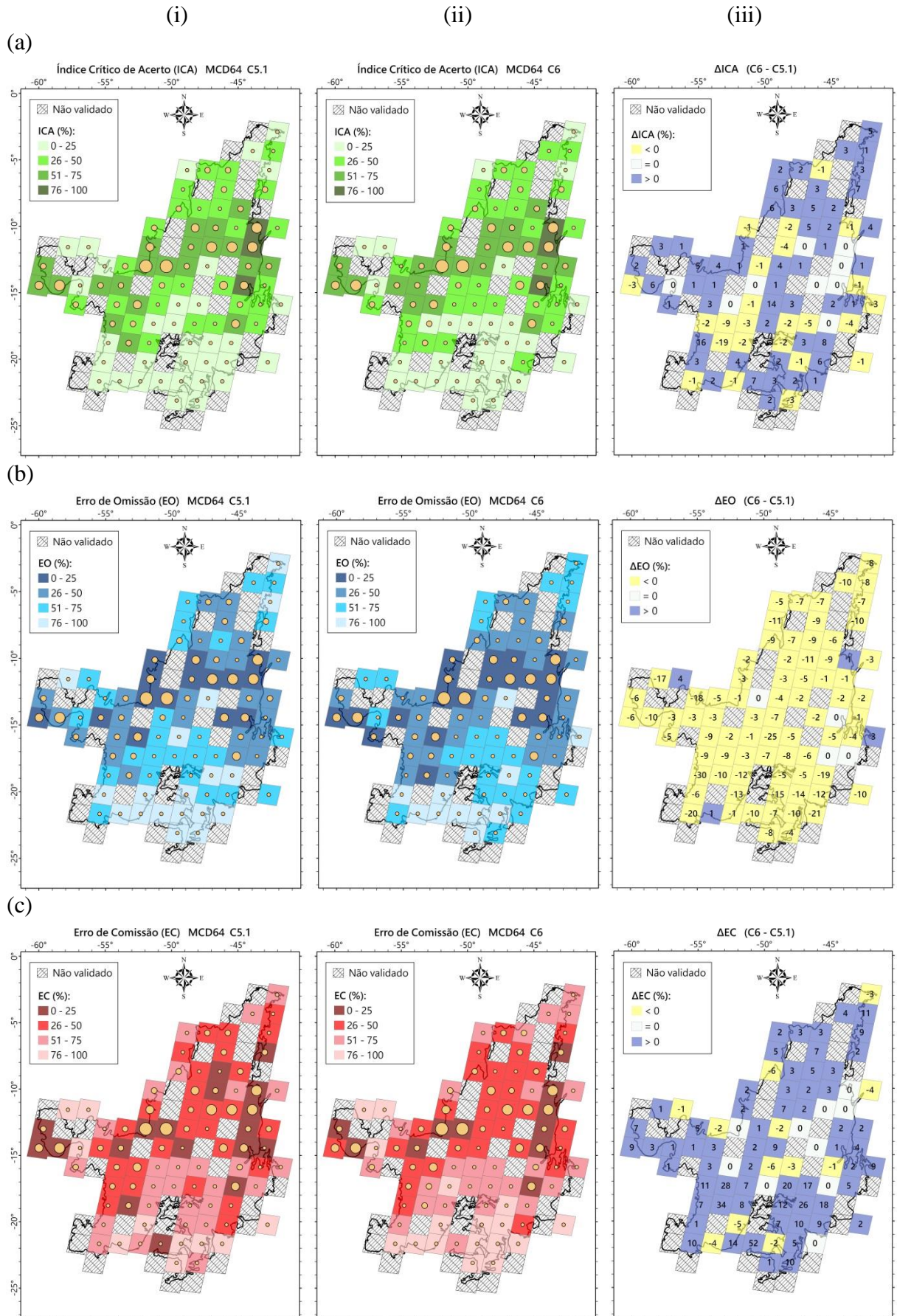
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Validação

5.1.1. Análise estatística geral

Nesta seção, apresenta-se a análise estatística das medidas de avaliação de precisão derivadas da tabela de contingência (ICA, EO, EC e V), além da correlação das áreas queimadas MCD64A1 com focos ativos VIIRS para verificar a aplicabilidade destes resultados aos demais anos não validados.

Os resultados quantitativos foram especializados (Figura 5) para C5.1 (coluna i), C6 (coluna ii) e a diferença entre as coleções ($\Delta = C6 - C5.1$) (coluna iii), que representa o avanço da atual coleção.



(d)

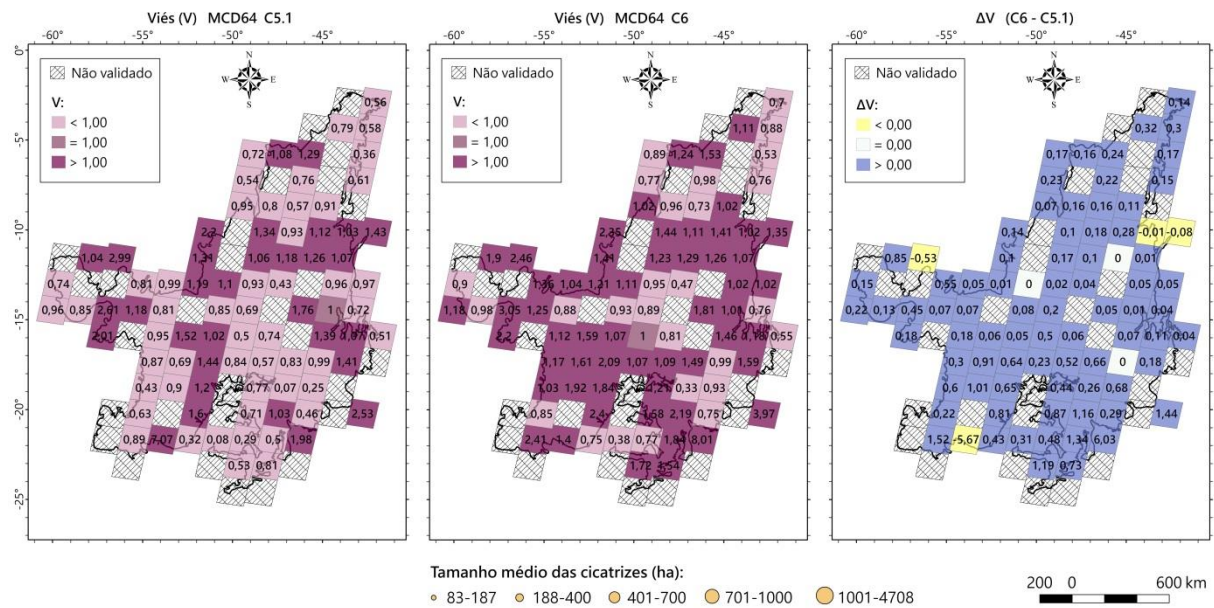


Figura 5. Percentagem de a) Índice Crítico de Acerto (ICA), b) Erro de Omissão (EO), c) Erro de Comissão (EC) e d) Viés (V) do MCD64A1 (i) C5.1, (ii) C6 e (iii) a diferença entre as coleções ($\Delta = C6 - C5.1$). Os círculos claros representam o tamanho médio das cicatrizes (em ha) obtido pela razão entre a área total queimada e o número de cicatrizes validadas, considerando as cicatrizes selecionadas em cada cena.

Podemos classificar os resultados do acerto (ICA) como baixo (0–25%), regular (26–50%), alto (51–75%) e elevado (76–100%); os resultados dos erros (EO e EC) como aceitável (0–25%), regular (26–50%), alto (51–75%) e elevado (76–100%); e os resultados do viés (V) como subestimação (< 1), neutralidade (= 1) e superestimação (> 1). Sendo assim, a C6 apresentou 24% das cenas com omissão aceitável, 34% com omissão regular, 29% com omissão alta e 13% com omissão elevada vs. 18%, 30%, 31% e 21% da C5.1 respectivamente. Logo, a atual coleção apresentou maior percentual de omissão aceitável e menor percentual de omissão elevada comparada à antiga coleção. Todavia, para EC, a C6 apresentou 13% das cenas com comissão aceitável, 36% com comissão regular, 31% com comissão alta e 20% com comissão elevada vs. 21%, 35%, 32% e 12% da C5.1 respectivamente. Neste caso, a C6 apresentou maior percentual de comissão elevada e menor percentual de comissão aceitável comparada à C5.1 e a todas as classes. Para ICA, o percentual de cenas com acerto alto e elevado é igual em ambas as coleções, no valor de 25% e 4% respectivamente. Os maiores percentuais estão nos acertos classificados como regular (35% para C6 e 32% para C5.1) e baixo (36% para C6 e 39% para C5.1). Considerando resultados satisfatórios como ICA acima de 50% e EO abaixo de 25%, o tamanho médio mínimo das cicatrizes detectadas foi de

188 ha. Por fim, de acordo com V, 61% das cenas subestimam a área queimada na C5.1, 67% superestimam na C6 e apenas 1% apresenta total equivalente ao dado de referência em ambas.

Por diversas vezes, cenas pertencem à mesma classe, portanto o avanço da coleção somente é exposto com clareza na análise da diferença. Os resultados espaciais mostram, claramente, um gradiente norte-sul no comportamento dos índices (Figura 5a–c, i), com exceção de V (Figura 5d, i), que não apresentou um padrão definido. Nota-se que os melhores resultados se concentram na parte norte do bioma (considerada acima do ponto Landsat 071 ou da latitude -15°) para ambas as coleções, coincidindo com as maiores cicatrizes de área queimada (círculos na Figura 5). As maiores imprecisões encontradas no sul, que é caracterizado por pequenas cicatrizes de queimadas, apontam que os resultados obtidos são semelhantes aos estudos anteriores mostrando que a C5.1 é incapaz de detectar pequenos incêndios em muitas outras regiões do globo (Hall et al., 2016; Wang et al., 2017; Zhu et al., 2017).

No geral, a C6 aumentou a precisão dos acertos de queimada, reduziu as omissões, aumentou as comissões e estimou um maior total de área queimada (Figura 5, ii). Especificamente, 61% das cenas aumentaram o ICA, 28% reduziram e 11% se mantiveram neutras; 90% reduziram o EO, 5% aumentaram e 5% se mantiveram neutras; 74% aumentaram o EC, 14% reduziram e 12% se mantiveram neutras; e 92% estimaram maior total de área queimada, 5% estimaram menos e 3% se mantiveram neutras. Embora ICA de ambas as coleções tenha comportamento individual semelhante, com discreta vantagem na C6, a diferença espacial concretiza a melhoria da nova coleção.

O comportamento apresentado entre os erros é chamado de perde-e-ganha, ou seja, enquanto um apresenta valores baixos, o outro naturalmente apresenta valores mais elevados. O estudo de Boschetti (2005), que aplica o conceito do Limite de Pareto para produtos de classificação binária (no caso, área queimada) utilizando os índices EO e EC, mostra que eles são interligados e conflitantes. A redução do valor de um será alcançada ao custo de aumentar o valor do outro, porque implicará uma mudança de classificação de pelo menos um pixel misto, fato conhecido como conceito de viés de baixa resolução. Por sua vez, o Limite de Pareto é uma técnica que aponta o valor mínimo que pode ser alcançado no EO (EC) com o máximo de EC (EO), e se baseia apenas na fração de área queimada contida dentro de um pixel de baixa resolução, assim como no tamanho deste pixel. Trabalhos futuros podem abordar o Limite de Pareto, que indica se os resultados foram limitados pelos dados de referência utilizados, ou se o desempenho do produto é consequência do próprio algoritmo.

Para as 84 cenas validadas, nossos resultados indicam que, em média, para o bioma Cerrado, há uma redução de 6,8% no EO e um aumento de 1,3% e 5,0% no ICA e EC respectivamente, quando se utiliza a C6. Para verificar se a diferença observada entre as duas coleções é estatisticamente significativa, aplicamos um teste de hipótese, considerando a hipótese nula de que os valores médios das medidas de avaliação de precisão para todas as cenas analisadas são iguais para ambas as coleções. Para as quatro medidas de avaliação de precisão, os valores retornados rejeitam a hipótese nula no nível de significância de 1%.

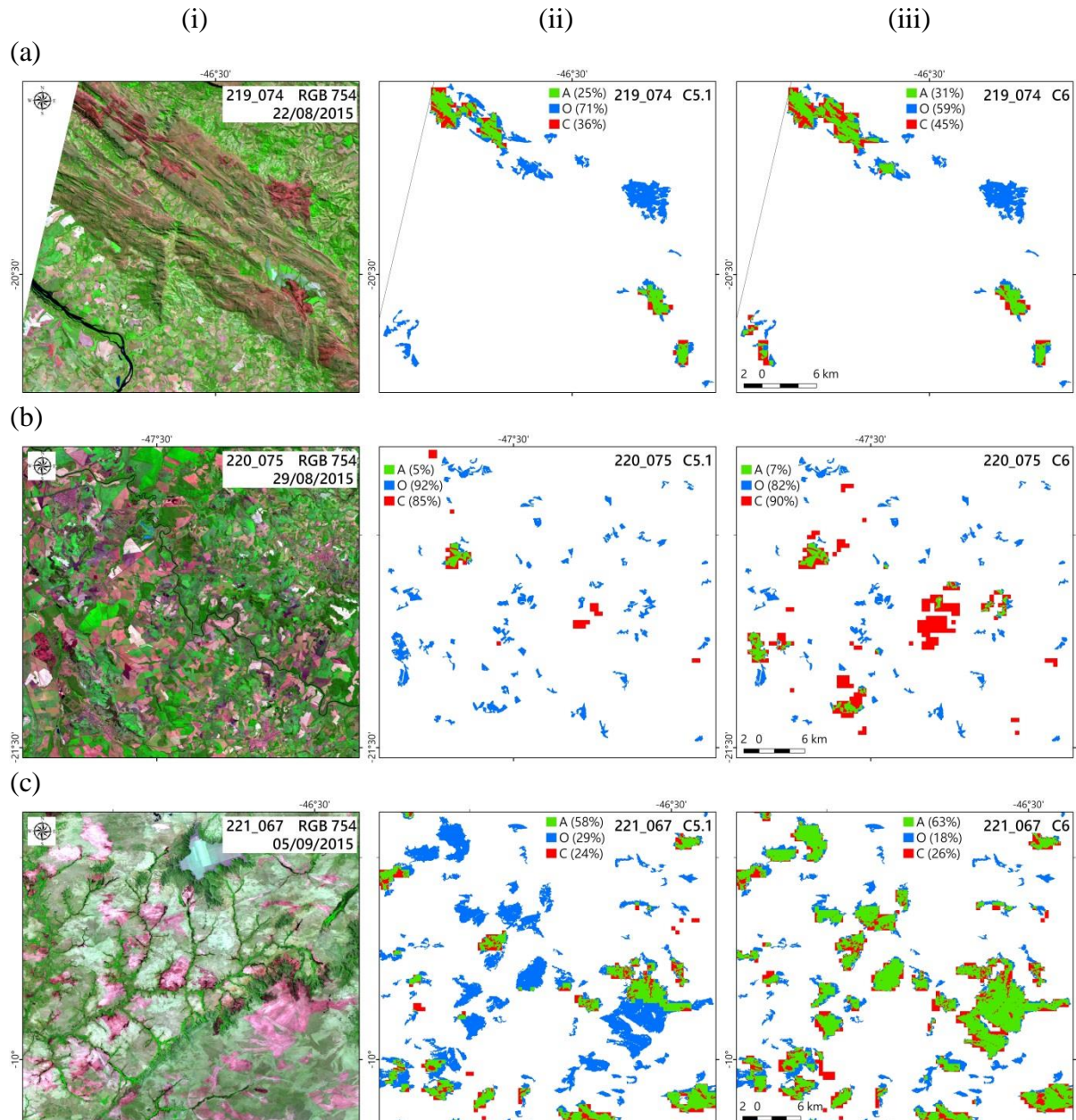
Comparando a média dos resultados de cada índice da C6 com os intervalos de confiança definidos por Pereira et al. (2017), apenas EO se enquadrou no intervalo esperado com 45%; EC e V excederam o intervalo com 51% e 1,36 respectivamente, enquanto ICA limitou-se a 36%. No mais, os nossos resultados gerais corroboram estudos anteriores (Alves et al., 2018; Giglio et al., 2018), embora o grau dos erros (acertos) tenha sido maior (menor) do que o esperado, principalmente para EC. O produto MCD64A1 é conhecido como um algoritmo conservador, que costuma apresentar comissões muito baixas. Este comportamento inesperado pode ser explicado pelo acréscimo total de quatro dias ao período das imagens validadas, devido às incertezas associadas às datações do MCD64A1 (Giglio et al., 2018).

O EC associado ao mascaramento por nuvem nas imagens de referência foi reduzido utilizando imagens com 10% ou menos de cobertura de nuvens. Além disso, o tempo de persistência das cicatrizes de queimada pode ser um fator limitante na precisão da detecção dos mapeamentos da escala global (Pereira et al., 2017). No entanto, o tempo de persistência espectral foi considerado no período de 16 dias entre os pares de imagens Landsat. O valor mediano do tempo de persistência para as classes de cobertura da terra predominantes em nossa área de estudo (Figura 1), ou seja, *savanna*, *woody savana* e *grassland*, varia entre 16 e 48 dias (Melchiorre e Boschetti, 2018).

As datas das imagens selecionadas na validação das cenas 218_067, 219_062 e 224_075 incluem apenas imagens do início das estações seca (junho) e fora da estação seca (outubro/novembro) (Tabela A1 do Anexo), com poucas e pequenas queimadas, explicando as altas ocorrências de EC e EO. Esse baixo desempenho obtido também foi observado por Alves et al. (2018) e pode estar relacionado à baixa carga de combustível acumulada e ao fogo menos intenso nesses períodos (Laris, 2005), sugerido pelo menor tamanho médio das cicatrizes deste conjunto de dados: 98, 168 e 118 ha respectivamente. Essas condições dificultam a precisão da detecção por um sensor de baixa resolução espacial como o MODIS.

Uma visão geral local dos resultados de validação pode ser vista na Figura 6 para quatro cenas com padrões espaciais de queimadas distintos: 219_074, 220_075, 221_067 e

225_073. Para melhor visualização, aproximamos em regiões onde as diferenças entre as coleções são mais perceptíveis. Baseado em uma inspeção visual, cicatrizes com grandes extensões e fortes sinais espectrais são, como esperado, mais facilmente identificadas. Cicatrizes menores e fragmentadas são mais difíceis de detectar, mesmo com uma área maior que a de um pixel do produto (500 m).



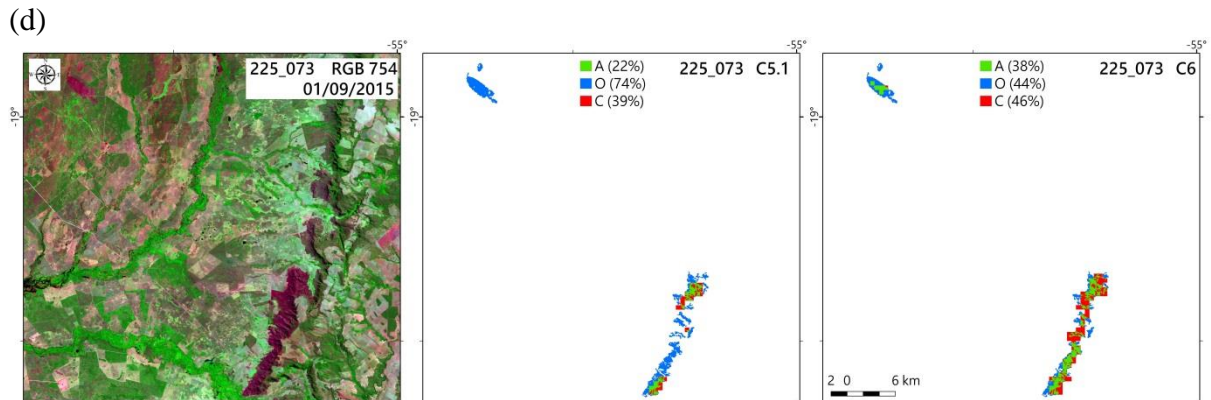


Figura 6. Exemplos da avaliação de precisão do produto MCD64A1 em relação às cicatrizes de referência: (i) Composição Landsat RGB 754 falsa cor mostrando cicatrizes queimadas em quatro cenas Landsat, representada pela última data usada na validação: a) 219_074, b) 220_075, c) 221_067, e d) 225_073. Comparação entre os resultados da validação de MCD64A1 (ii) C5.1 e (iii) C6 nas zonas selecionadas, destacando os acertos de queimada (A, %, verde) e os erros de omissão (O, %, azul) e comissão (C, %, vermelho).

Por exemplo, a cena 220_075 está inserida no interior do estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil (Rudorff et al., 2010), com fazendas para cultivo da planta, onde frentes de fogo pequenas e rápidas contribuem para as omissões da área queimada. Por outro lado, na cena 221_067 localizada no norte do bioma, que é caracterizada por grandes cicatrizes, a C6 apresenta um número reduzido de EO em relação à C5.1. No geral, o algoritmo atualizado captura mais pixels queimados e a consistência entre os resultados da C6 e as cicatrizes de referência foi superior. A C5.1 é mais conservadora, pois um menor EC é obtido em detrimento de altas ocorrências de EO. A C6, por sua vez, possui maiores EC com a maioria ocorrendo na borda das cicatrizes reais, o que também se deve à resolução grosseira do produto. Em contraste, os casos isolados representam a fração minoritária do EC. Essa desvantagem é comum a outros métodos na mesma região relatada por Libonati et al. (2015).

Outro ponto importante é que os resultados espaciais significativos não estão estritamente relacionados aos maiores deltas, uma vez que os índices são derivados da contabilização das células da tabela de contingência. Cenas com menores quantidades de pixels queimados serão mais sensíveis a pequenas alterações. Tomando como exemplo as cenas 221_067 e 225_073, ΔICA foi equivalente a 5% e 16% respectivamente e ΔEO foi equivalente a -11% e -30% respectivamente. Entretanto, espacialmente, houve uma melhora representativa na cena 221_067, na qual 242.996 ha foram queimados contra 3.747 ha da 225_073.

Visando verificar se existe correlação entre as duas variáveis e identificar se a validação de 2015 se aplica a outros anos, foi calculada a correlação de Kendall entre as áreas

queimadas das coleções MCD64A1 e os focos ativos VIIRS para 2013, 2014, 2015 e 2016 (Figura 7). A C6 apresentou uma correlação mais alta com os focos ativos VIIRS do que a C5.1. Para C6, o maior τ foi encontrado para o ano de 2014 ($\tau = 0,78$) e o menor para 2016 ($\tau = 0,71$). O valor médio de τ foi de 0,74 e o desvio padrão foi de 0,033. Para o C5.1, o melhor resultado foi encontrado para o ano de 2014 ($\tau = 0,73$) e o pior para 2013 e 2016 ($\tau = 0,68$). Nesse caso, o valor médio de τ foi de 0,70 e o desvio padrão foi de 0,026. Em todos os gráficos de dispersão, a linha de regressão passa quase pela origem e as inclinações são quase as mesmas para as coleções e todos os anos.

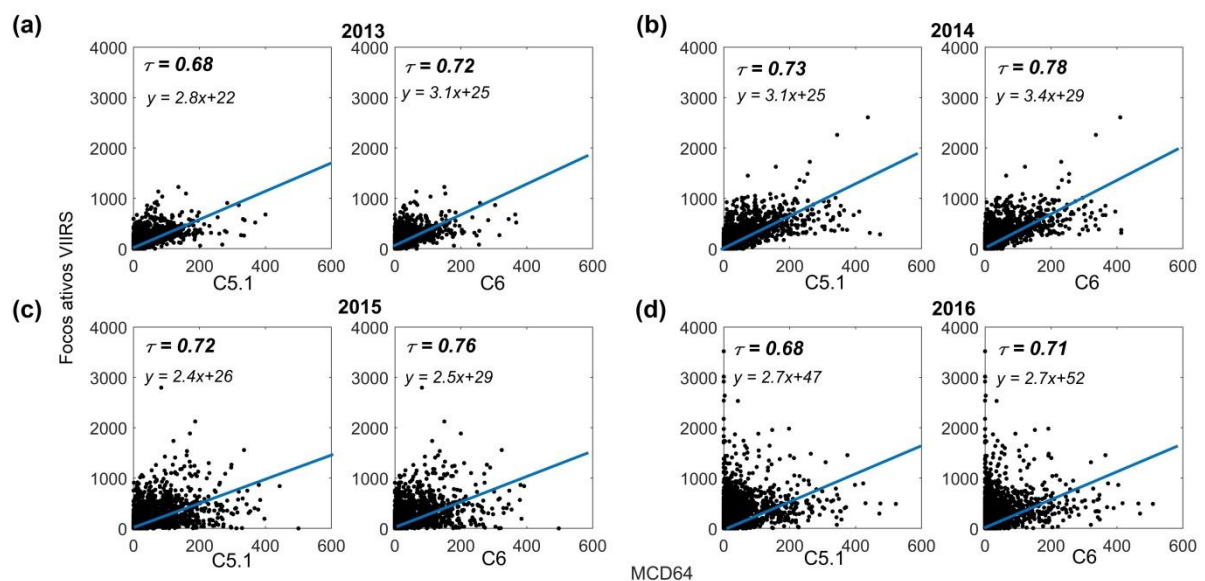


Figura 7. Gráficos de dispersão com as relações entre o total anual de área queimada (km^2) das coleções 5.1 e 6 do MCD64A1 e o número total de focos ativos VIIRS em uma grade de 25×25 km. Cada subfigura (a-d) representa a correlação para os anos de 2013 a 2016. A linha de regressão (em azul) e o coeficiente Tau de Kendall (τ) também são exibidos em cada plotagem.

O acordo anual global se revelou alto e estável na área estudada, em um período que inclui ano úmido, de precipitação normal e de seca extrema. Vários estudos sugerem que as relações clima-fogo fornecem uma base geral para a compreensão da sazonalidade natural e da frequência do fogo na região estudada (Hoffmann et al., 2012; Nogueira et al., 2017b). Assim, há razões para acreditar que a nossa validação baseada em pixel de 2015, usando as imagens Landsat, é representativa de um conjunto diversificado de anos, sugerindo uma estabilidade padrão de erro. No entanto, outros fatores também podem influenciar a atividade do fogo e podem contribuir para alguma variabilidade, incluindo fatores políticos e econômicos (Durigan e Ratter, 2016; Lapola et al., 2014).

5.1.2. Análise estatística estratificada

Abordagens de validação de área queimada sobre uma extensa área de estudo, como todo o bioma Cerrado, exigem a seleção de grupos ou subamostras com características similares, sendo essenciais para garantir a confiabilidade e representatividade dos resultados de validação (Boschetti et al., 2016; Padilla et al., 2017). Aqui, o objetivo foi definir subamostras das 84 cenas validadas (Figura 3) que minimizem a variância da avaliação geral da exatidão, em vista da forte variabilidade espacial de área queimada observada. Assim, estratificamos nossa região de estudo em 4 grupos de acordo com o número de focos ativos registrados pelo VIIRS, por cena Landsat, em 2015 (Figura A1 do Anexo). Estes grupos foram definidos da seguinte forma: i) Grupo 1 - 200 a 2.000 focos ativos VIIRS, ii) Grupo 2 - 2.001 a 10.000 focos ativos VIIRS, iii) Grupo 3 - 10.001 a 20.000 focos ativos VIIRS e iv) Grupo 4 - 20.001 a 35.000 focos ativos VIIRS.

Cicatrizes pequenas (25–100 ha) são altamente frequentes (acima de 62%) em todos os grupos, principalmente no grupo 1 com 75% (Figura 8, i). Por outro lado, as grandes cicatrizes (100–1500 ha) são menos frequentes (entre 25–35%) e as megacicatrizes (> 1500 ha) são muito incomuns (menos de 3%) para todos os grupos. No entanto, as megacicatrizes são responsáveis pela maior frequência de área queimada nos grupos 2 a 4 (acima de 50%), enquanto que as cicatrizes pequenas e grandes contribuem mais (35% e 54% respectivamente) do que as megacicatrizes para o grupo 1 (11%) (Figura 8, ii). Vale ressaltar que quase a totalidade do grupo 1 é observada na parte sul do Cerrado, enquanto os grupos 3 e 4 são observados apenas na parte norte. Os padrões contrastantes norte-sul em termos de quantidade de área queimada e tamanho e distribuição de cicatrizes de fogo estão intrinsecamente relacionados aos padrões de uso do solo, como será abordado mais abaixo.

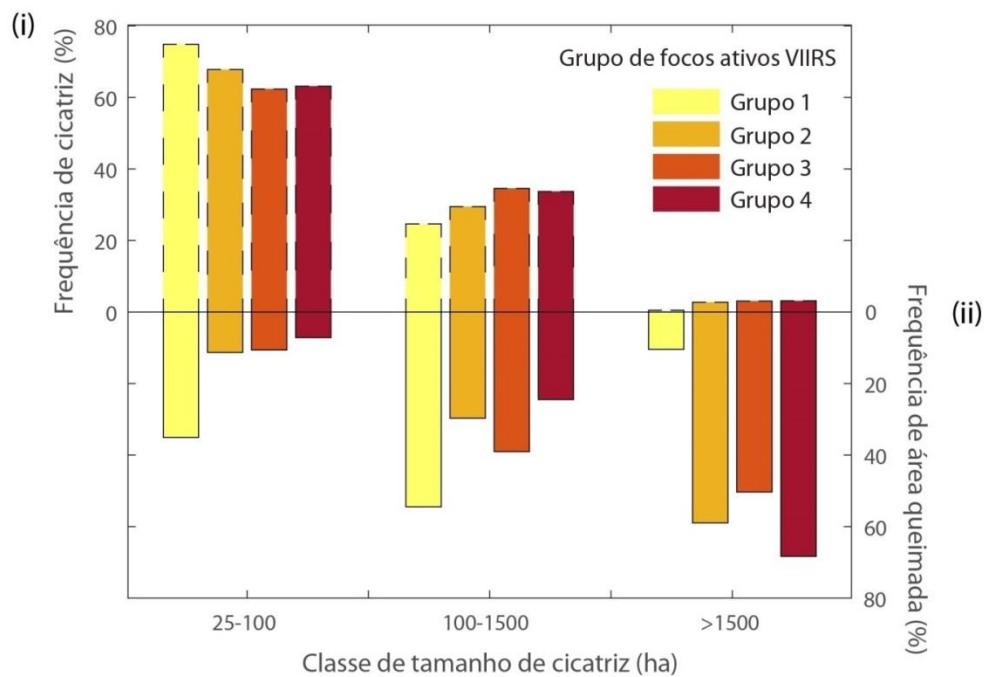
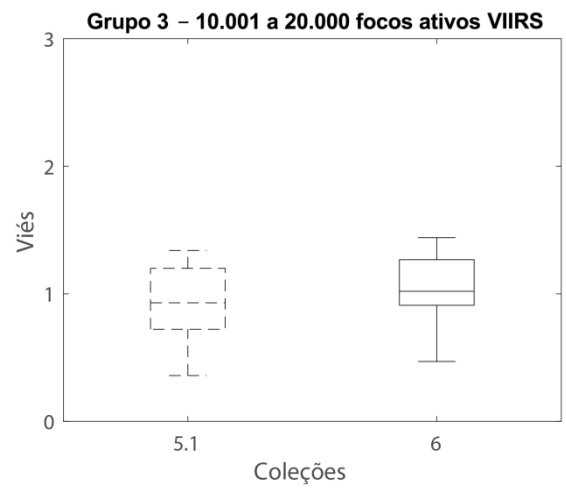
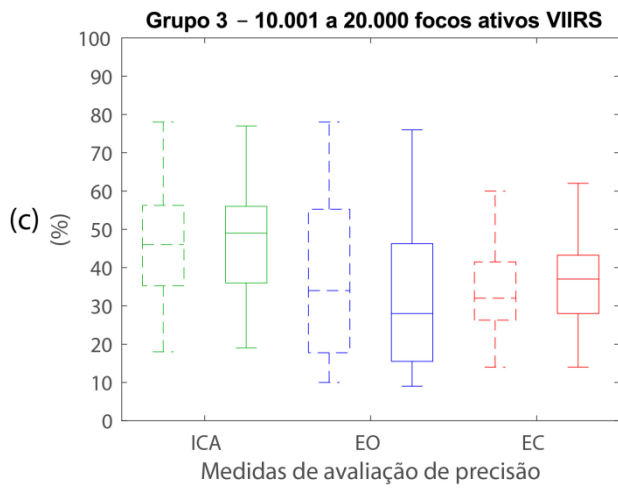
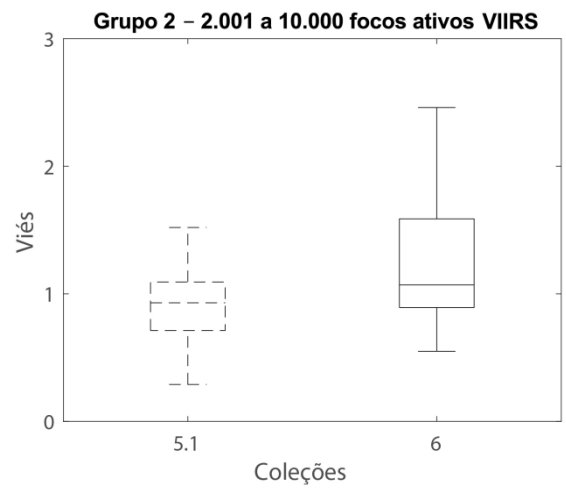
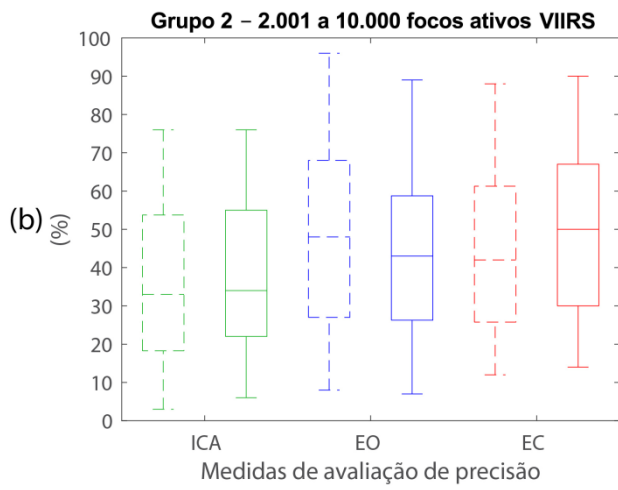
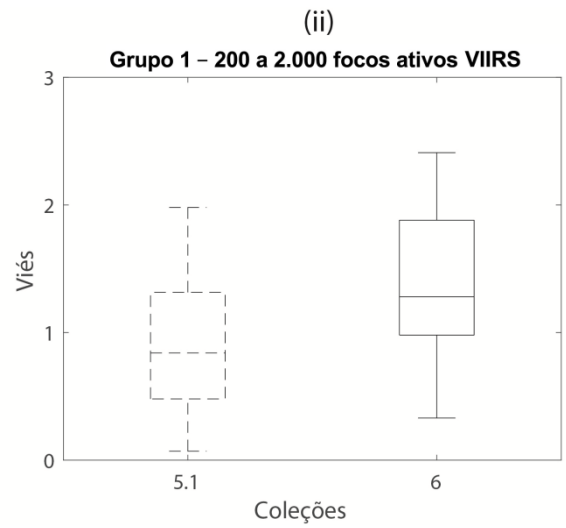
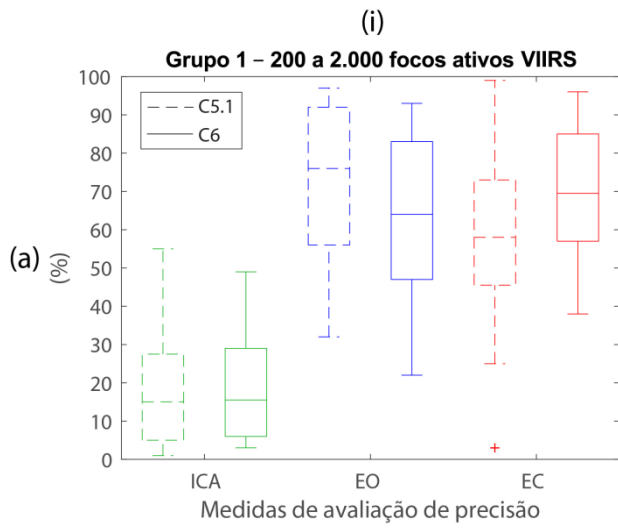


Figura 8. Frequência (i) do número de cicatriz (% , barras tracejadas) e (ii) do total de área queimada (% , barras sólidas) por classe de tamanho de cicatriz (25–100 ha, 100–1500 ha e > 1500 ha) para cada grupo: Grupo 1 (200 a 2.000 focos ativos VIIRS, barras amarelas), Grupo 2 (2.001 a 10.000 focos ativos VIIRS, barras amarelo-escuro), Grupo 3 (10.001 a 20.000 focos ativos VIIRS, barras laranja) e Grupo 4 (20.001 a 35.000 focos ativos VIIRS, barras vinho).

Em geral, os gráficos de caixa evidenciam uma menor variabilidade das 4 medidas de avaliação de precisão conforme o aumento dos focos ativos (grupos 1 a 4), como também um aumento de ICA e redução de EO e EC (Figura 9, i). Para ambas as coleções, o EO está em torno de 60–80% (20–30%) maior (menor) nas áreas classificadas como grupo 1 (grupo 4) com a menor (maior) densidade de focos ativos. A C6 apresenta uma ligeira melhoria no ICA, uma melhoria significativa no EO e uma ligeira deterioração no EC. ICA, EO e EC da C6 tem amplitude menor que C5.1 em todos os grupos de focos ativos, nos grupos 2 a 4, e somente no grupo 1 respectivamente. Com relação à medida de viés, a C5.1 (C6) subestima (superestima) o total de área queimada com maior frequência nos grupos 1, 2 e 3 (Figura 9a–c, ii), apresentando mediana inferior (superior) a 1,0. No entanto, ambas as coleções superestimam (valores > 1,0) o total de área queimada no grupo 4 com maior quantidade de focos ativos (Figura 9d, iv). Somente no grupo 4, *outliers* não foram identificados.



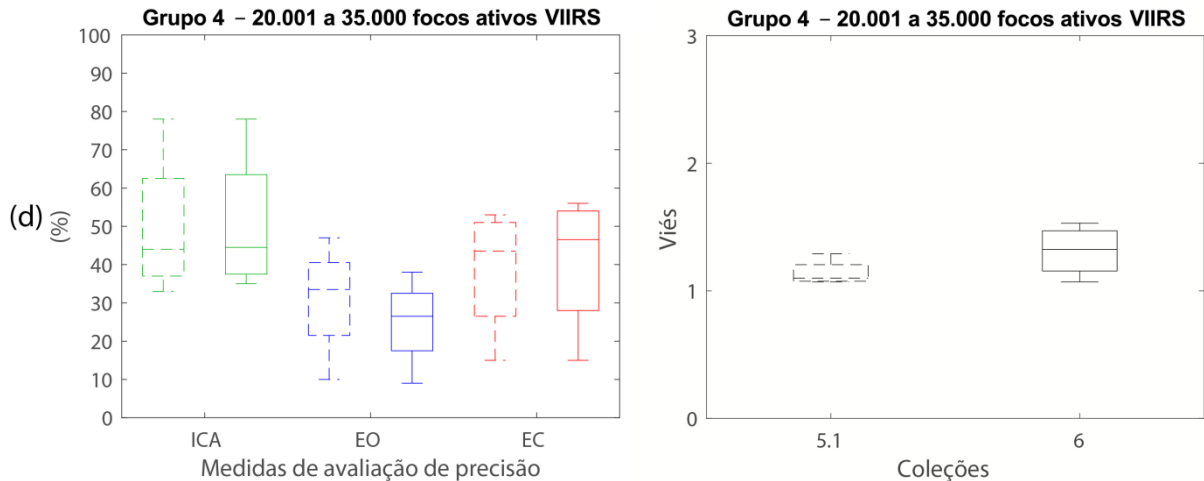


Figura 9. Gráficos de caixa com os resultados das medidas de avaliação de precisão (i) Índice Crítico de Acerto - ICA, Erro de Omissão - EO, Erro de Comissão - EC e (ii) Viés - V para MCD64A1 C5.1 (caixas tracejadas) e MCD64A1 C6 (caixas sólidas), categorizados de acordo com as classes da Figura A1: a) Grupo 1 - 200 a 2.000 focos ativos VIIRS, b) Grupo 2 - 2.001 a 10.000 focos ativos VIIRS, c) Grupo 3 - 10.001 a 20.000 focos ativos VIIRS e d) Grupo 4 - 20.001 a 35.000 focos ativos VIIRS.

Como as medidas de avaliação de precisão da tabela de contingência consideram cada erro de forma generalizada, realizamos uma análise mais detalhada. Aqui, consideramos o EC em dois tipos: um EC que ocorre na borda das cicatrizes queimadas de referência (EC_B) para avaliar a superestimação de sua área, e um EC isolado (EC_{FA}), que é considerado um falso alarme de detecção de área queimada (Libonati et al., 2015). O mesmo procedimento é aplicado ao EO: é classificado como uma omissão parcial (EO_P) quando se refere a uma subestimação do tamanho da cicatriz de referência, ou é classificado como uma omissão de cicatriz (EO_{OC}) quando nenhuma porção da queimada é detectada. Para tal, analisamos as sobreposições entre as cicatrizes Landsat e MCD64A1, de forma a separar EO_P (EC_B) de EO_{OC} (EC_{FA}). Desta forma, podemos avaliar a capacidade do algoritmo em identificar cicatrizes menores e quantificar os falsos alarmes e omissões de cicatrizes.

Como mostrado na Figura 10a, EC_{FA} (Figura 10a, i) e EO_{OC} (Figura 10a, ii) são maiores para níveis mais baixos de queima (grupo 1), porém menores para níveis mais altos de queima (grupo 4). EC_{FA} representa cerca de 30% no grupo 1, com forte e sucessiva diminuição nos demais grupos (abaixo de 8%). C6 apresenta maior falsa detecção em relação à C5.1 nos grupos 1 e 2, e equivalente nos grupos 3 e 4. Por outro lado, EO_{OC} foi reduzida no novo processamento e, novamente, o grupo 1 apresentou o pior desempenho dentre os quatro (acima de 50%), enquanto os demais grupos ficaram com valores abaixo de 22%.

A partir da proporção de cada tipo de erro na área total de EC e EO (Figura 10b), é possível concluir que os erros de ambas as coleções estão mais associados à

subestimação/superestimação do tamanho da cicatriz, exceto para baixos níveis de queima, representados pelo grupo 1. Comparando EC_{FA} entre coleções, a C6 apresenta uma proporção maior que a C5.1 para os grupos 1 e 2 (um excedente de 7% e 3%, respectivamente), mesma proporção para o grupo 3 e menor proporção, embora mínima, de 1% para o grupo 4. Por outro lado, a proporção de EO_{OC} é reduzida na C6, e o grupo 1 teve o pior desempenho entre os quatro grupos (acima de 70%), enquanto os grupos seguintes apresentaram proporção entre 31% e 49%.

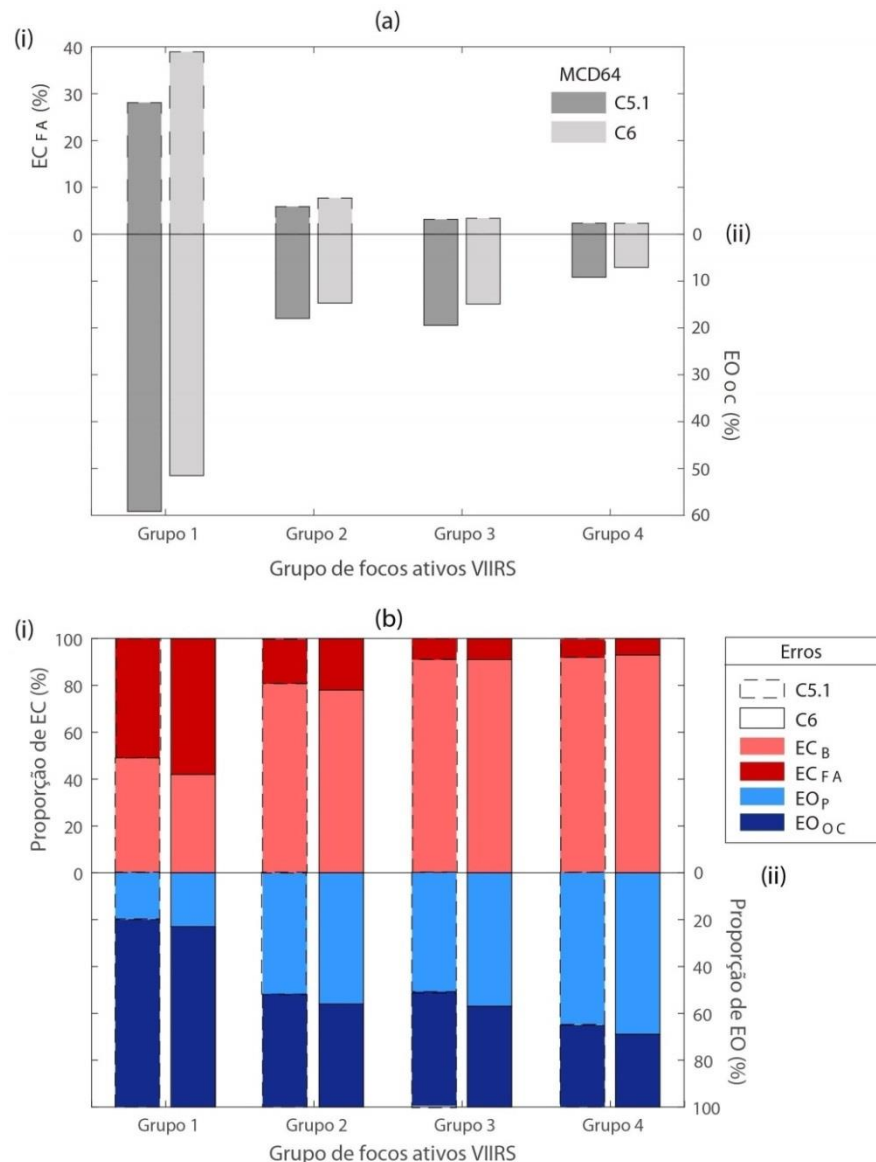


Figura 10. a) Falsos alarmes (EC_{FA} , %, barras tracejadas, i) e omissões de cicatrizes (EO_{OC} , %, barras sólidas, ii) por grupo para cada coleção MCD64A1: C5.1 (barras cinza-escuro) e C6 (barras cinza-claro); b) Proporção de falsos alarmes (EC_{FA} , %) e comissões de borda (EC_B , %) na área total do erro de comissão (barras em tons de vermelho, i), e proporção de omissões de cicatrizes (EO_{OC} , %) e omissões parciais (EO_P , %) na área total do erro de omissão (barras em tons de azul, ii) por grupo e para cada coleção MCD64A1: C5.1 (barras tracejadas) e C6 (barras sólidas).

Finalmente, o sucesso da melhoria significativa na detecção de mais área queimada pela C6 se deve à utilização de dados de entrada refinados MODIS C6 e à inclusão/modificação de alguns parâmetros no algoritmo, combinados com o conhecimento empírico dos desenvolvedores. Resumidamente, segundo Giglio et al. (2018), o algoritmo foi ajustado de forma que possibilitou i) a redução das células de grade não mapeadas por falta de informação, devido à correção de comissões de nuvens e à janela temporal encurtada; ii) data estimada da queima mais precisa também devido à janela temporal encurtada; iii) limiares menos rigorosos são impostos para classificar um pixel como queimado; iv) redução do limiar mínimo de probabilidade posterior da classificação provisória, para reduzir a frequência de EO; v) filtro para confirmar a classificação das queimadas é aplicado para ajudar a capturar pequenas queimadas que foram previamente removidas indiscriminadamente, dando nova chance ao pixel não queimado vizinho ao queimado.

Além disso, vale ressaltar que um produto global busca se adequar ao comportamento mais provável da maioria das diferentes regiões. Desta forma, podemos concluir que, no caso do Cerrado, os resultados gerais da MCD64A1 C6 corroboram a) aumento considerável do total de área queimada mapeada; b) desempenho significativamente melhor na detecção de pequenas queimadas; e c) redução (aumento) de EO (EC) relatada na divulgação de validação global do algoritmo atualizado (Giglio et al., 2018).

5.1.3. Comparação com uso do solo

Nesta seção, uma avaliação das implicações da influência do uso do solo na estimativa da variabilidade dos erros e padrões da C6 e C5.1 foi realizada sobre a região de estudo. Entende-se como uso do solo a conversão ou o manejo (terras desenvolvidas) da cobertura natural do solo para realização de atividades humanas. Aqui, serão consideradas apenas classes de uso do solo com superfície vegetada.

Cerca de 43% do bioma Cerrado pertence a algum uso do solo, baseado nas classes “*Grasslands*”, “*Croplands*” e “*Cropland/Natural Vegetation Mosaic*” da classificação do MCD12Q1-IGBP C6 para 2015. A partir da distribuição do uso do solo em 3 níveis de IUS (Figura 11), nota-se que a maioria das cenas é caracterizada com baixa IUS no norte do bioma, mais especificamente 83%. No sul, média e alta IUS somam juntas 76% das cenas. Embora, aproximadamente, metade da área da cena 221_067 possua um mosaico de UCs, ela foi classificada como alta IUS por ter 90% de *grasslands*. De acordo com Friedl et al. (2010),

esta classe possui baixa precisão de usuário e confusão espectral com *open shrublands* e *savannas*, além da classe incluir todos os tipos de vegetação herbácea (< 2 m).

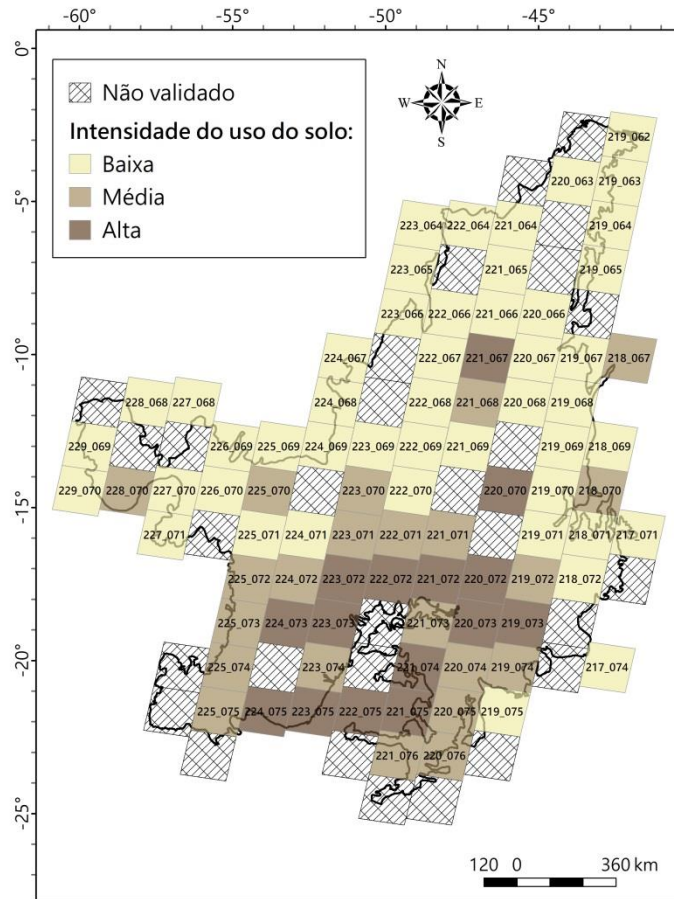


Figura 11. Distribuição da intensidade do uso do solo no Cerrado no ano de 2015, por cena Landsat validada. O conjunto de dados utilizado para avaliar a intensidade do uso do solo foi o produto MCD12Q1-IGBP C6. As cores representam o uso do solo ocupando entre 0–50% (baixa, amarelo), 51–75% (média, marrom-claro) e 76–100% (alta, marrom-escuro) de cada cena, considerando as classes *Grasslands*, *Croplands* e *Cropland/Natural Vegetation Mosaic*.

Estes resultados corroboram os resultados espaciais da validação, onde as coleções detectam com maior precisão as queimadas em vegetação natural, devido às suas características espectrais, espaciais e de intensidade. Os padrões contrastantes norte-sul em relação à quantidade de área queimada e ao tamanho e distribuição das cicatrizes ocasionadas pelo fogo estão intrinsecamente relacionados aos padrões de uso do solo, como observado na Figura 11. Estes achados estão de acordo com a predominância de áreas menos antropizadas no norte e com um processo de conversão de terras bem marcado no sul (Lapola et al., 2014). Na parte sul do Cerrado, a vegetação natural foi convertida em agricultura, lavoura e pecuária, caracterizadas por paisagens fragmentadas e pequenos incêndios menos inflamáveis (Durigan

e Ratter, 2016). Em contraste, a região norte tem uma maior concentração de APs (Carranza et al., 2014; Mistry et al., 2005), como mostra a Figura 1.

O Plano de Ação para Prevenção e Controle de Desmatamento e Incêndio no Cerrado foi recentemente implementado, reconhecendo a necessidade de melhor conservação do bioma (Beuchle et al., 2015). No entanto, apesar dos esforços políticos, o Cerrado apresentou um aumento na conversão de terras para pastagens e áreas agrícolas nas últimas décadas, especialmente nas regiões de transição com os biomas Pantanal e Mata Atlântica. Estas áreas de transição podem estar associadas, principalmente, às plantações de cana-de-açúcar e soja, pastagens e desmatamento de atividades florestais secundárias (Dias et al., 2016; Lapola et al., 2014; Song et al., 2018). A relação entre queimada e desmatamento ainda é bastante comum, uma vez que o fogo ainda é a principal ferramenta para os agricultores limparem e abrirem áreas, apesar das políticas proibitivas (Van Der Werf et al., 2010; van Marle et al., 2017). Um estudo sobre a expansão da terra para terras agrícolas e pastagens em toda a América Latina, de 2001 a 2013, descobriu que essa prática levou ao desmatamento no centro do estado do MT e que novas terras agrícolas vieram de terras não florestais no Cerrado (Graesser et al., 2015). O bioma testemunhou a inclusão mais significativa de novas áreas de terras agrícolas e pastagens, com 9,96 Mha e 13 Mha, respectivamente. Expansões significativas ocorreram majoritariamente nos estados MT, GO e no sul do MS (Pivello, 2011).

Incêndios agrícolas ainda são subestimados por produtos derivados de satélites (Giglio et al., 2018), porque estes fornecem melhor desempenho de precisão onde os padrões espaciais de área queimada são mais extensos. Embora os autores do novo algoritmo tenham observado maior total de área queimada na C6, ainda há EC envolvido na quantificação da área queimada. Este caso também pode ser observado neste estudo, devido às altas comissões registradas na região sul do Cerrado. As áreas queimadas resultantes de queimas prescritas associadas às práticas agrícolas são subestimadas até mesmo por imagens de satélite de resolução espacial média, como o Landsat 30 m (Nowell et al., 2018).

Neste contexto, para entender as relações entre uso do solo e a ocorrência de EC e EO, combinamos as observações das Figuras 5 e 11 na Tabela 5, que fornece o número total de cenas em cada combinação de níveis de IUS (baixa, média e alta) com os erros (0–25%, 26–50%, 51–75% e 76–100%). No geral, para C5.1, EO maior que 50% foi observado em áreas com baixa (número de cenas igual a 17), média (número de cenas igual a 15) e alta (número de cenas igual a 12) IUS. Resultados semelhantes foram encontrados em terras agrícolas russas, onde a C5.1 perdeu a maioria das cicatrizes de queimadas (Hall et al., 2016; Zhu et al., 2017) e em áreas montanhosas na China, caracterizadas por pequenos incêndios (Fornacca et

al., 2017). Esta disparidade diminuiu na C6 de 17 para 13, 15 para 11 e 12 para 11 no número de cenas, respectivamente, para baixa, média e alta IUS. Por exemplo, ao usar C6, há uma redução de 2% e 8% do número de cenas dentro de classes de EO de 51–75% e 76–100% respectivamente, e um aumento de 6% e 5% no número de cenas dentro das classes de EO de 0–25% e 26–50% respectivamente. Para regiões com altos níveis de IUS e, conseqüentemente, ocupadas por cicatrizes pequenas e fragmentadas, C6 apresenta redução no número de cenas apresentando EO entre 76–100% e aumento no número de cenas apresentando EO menor que 25%, quando comparado com a C5.1. Em relação ao EC maior que 25%, a maioria ocorre em regiões de baixa IUS, enquanto que altos níveis de IUS são apresentados em 14% e 28% dos cenários para C5.1 e C6 respectivamente. No caso de alta IUS, o número de cenas que mostram EC maior que 76% aumentou em 26% na C6 comparado à C5.1.

Tabela 5 – Resumo do número de cenas da comparação entre classes de intensidade do uso do solo (IUS) (baixa, 0–50%; média, 51–75%; e alta, 76–100%) da Figura 11 e os intervalos dos erros de omissão (EO) e comissão (EC) (0–25%, 26–50%, 51–75% e 76–100%) da Figura 5 para MCD64A1 C5.1 e C6.

C5.1 / C6					
EO (%)	0-25	26-50	51-75	76-100	<i>Total</i>
IUS					
Baixa	13 / 15	16 / 18	12 / 11	5 / 2	46
Média	1 / 2	7 / 10	9 / 7	6 / 4	23
Alta	1 / 3	2 / 1	5 / 6	7 / 5	15
<i>Total</i>	15 / 20	25 / 29	26 / 24	18 / 11	84

EC (%)	0-25	26-50	51-75	76-100	<i>Total</i>
IUS					
Baixa	11 / 8	19 / 21	11 / 12	5 / 5	46
Média	4 / 3	7 / 7	9 / 7	3 / 6	23
Alta	3 / 0	3 / 2	7 / 7	2 / 6	15
<i>Total</i>	18 / 11	29 / 30	27 / 26	10 / 17	84

5.2 Caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado (2003 a 2017)

De acordo com os resultados da validação obtidos nas seções anteriores, o produto MCD64A1 C6 demonstrou melhor precisão nas classificações das áreas queimadas no Cerrado. Quando contabilizamos o total de área queimada, em 2015, detectado pelo MCD64A1 C6 (125.325 km²) em comparação ao valor obtido pela C5.1 (104.172 km²), vemos que a nova coleção estima uma área maior. Vale ressaltar que tais estimativas são bastante superiores às aquelas obtidas pelo primeiro produto oficial de área queimada do MODIS, o MCD45A1 C5.1 (79.737 km²), excluindo pixels com baixo grau de confiança de detecção (QA = 5), de acordo com o guia do produto (MCD45A1 C5.1 *User's Guide*). Tais resultados indicam que a nova coleção MCD64A1 C6 é mais adequada para o mapeamento de áreas queimadas, em contraste com o antigo algoritmo do produto MCD45A1, o qual é considerado conservativo (Giglio et al., 2018).

Uma comparação entre o produto MCD64A1 C5.1 e o MCD45A1 demonstrou que o último consegue apenas identificar 48% do total de área queimada global (Padilla et al., 2014) e apresenta 3,3 vezes menos detecções do que os dados de referência no Cerrado (Libonati et al., 2015). Nesta conformidade, podemos afirmar que o atual conhecimento sobre a variação espaço-temporal da distribuição de áreas queimadas no Cerrado é ainda limitado, pois os atuais estudos (Araújo et al., 2012; Mataveli et al., 2018) sobre o assunto utilizam o produto ultrapassado MCD45A1. Acresce que ambos os estudos que utilizaram o MCD45A1, consideram apenas detecções de uma das quatro classes disponíveis de pixels queimados e, portanto, fornecendo estimativas extremamente subestimadas sobre o padrão de fogo na região. Por exemplo, o total de área queimada para o Cerrado durante 2015 pelo método dos dois estudos aponta um valor de apenas 53.020 km² de área queimada, valor este que é da mesma ordem de grandeza encontrada na diferença entre os totais do MCD64A1 C5.1 e C6, de aproximadamente 21.153 km².

Desta forma, tais estudos fornecem uma compreensão inadequada sobre o comportamento do regime de fogo na região, justificando a necessidade de uma nova abordagem da caracterização espaço-temporal das áreas queimadas no Cerrado. Neste contexto, esta seção apresenta os resultados quantitativos da caracterização espaço-temporal da variabilidade sazonal e interanual das áreas queimadas do Cerrado em um período de 15 anos (2003 a 2017), recorrendo à base de dados MCD64A1 C6.

A Tabela A3 do Anexo apresenta o total de área queimada no bioma Cerrado para o período de estudo, assim como a contribuição relativa de cada mês e ano para o total de área queimada. Segundo os resultados obtidos, um total de 1.831.617 km² foi queimado no

território do Cerrado entre 2003 e 2017, uma média de 122.108 km² por ano. Essencialmente, os meses de junho a outubro contribuíram com 92% do total, coincidindo com o período mais seco do ano. As savanas são altamente inflamáveis durante a estação seca (Durigan & Ratter, 2016) e possuem elevado poder de regeneração (Castro-Neves, 2007), o que possibilita a requeima de uma mesma região em um menor intervalo de tempo. De fato, a análise da variabilidade sazonal (Figura 12) indica que setembro é o mês que registra maior média de área queimada no bioma com 50.824 km², seguido em declínio por agosto (28.226 km²), outubro (19.457 km²), julho (9.794 km²) e junho (4.271 km²). Os demais meses apresentam médias baixas (valores abaixo de 2.685 km²) e menos discrepantes entre si.

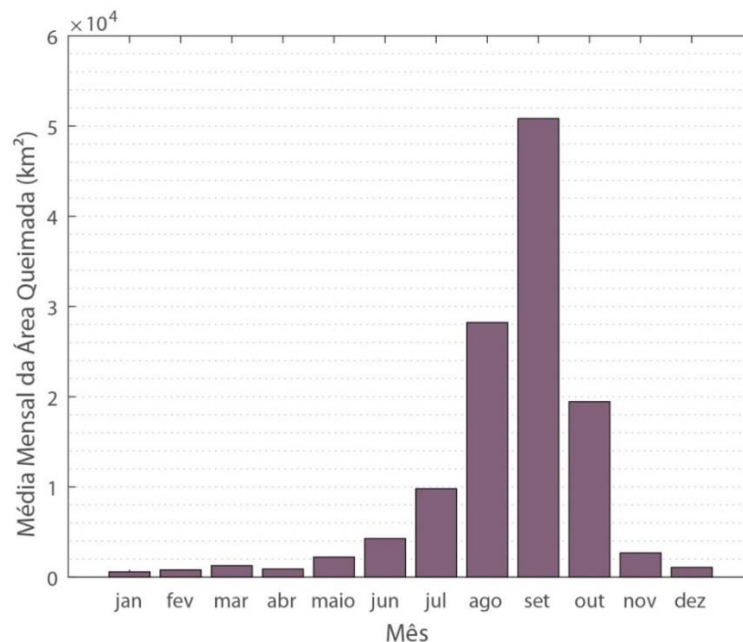


Figura 12. Variabilidade sazonal das áreas queimadas (km²) no Cerrado, com base na média mensal do período de 2003 a 2017, de acordo com o MCD64A1 C6.

Os resultados gerais concordam com os encontrados por Libonati et al. (2015). A variabilidade intra-anual das áreas queimadas está fortemente relacionada aos fatores climáticos (Armenteras-Pascual et al., 2011). O inverno apresenta condições mais favoráveis para a ocorrência de queimadas, isto é, pouca precipitação, baixa umidade relativa do ar, temperaturas mais elevadas e aumento na quantidade de radiação solar incidente (Araújo et al., 2012). A combinação dessas variáveis favorece a compreensão da intensidade e extensão das áreas queimadas, que por sua vez necessita de um ambiente muito seco e com temperaturas elevadas. Isso ocorre nessa época do ano porque os dois principais sistemas produtores de precipitação no Brasil, isto é, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS,

Kousky, 1988) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT, Marengo & Hastenrath, 1993) estão descaracterizadas, sendo mais atuantes na primavera e no verão. Entretanto, embora o período de estiagem no Cerrado se inicie em maio, as condições da vegetação estão mais suscetíveis ao fogo ao final da estação seca (Nogueira et al., 2017b).

A representação da variabilidade interanual do total de área queimada obtida para o Cerrado no período de 2003 a 2017 é apresentada na Figura 13. A figura mostra que existe uma grande variabilidade de ano para ano na região, por exemplo, o acumulado anual de área queimada aponta 2010, 2007 e 2012 como os anos mais críticos afetados pelo fogo (248.925, 240.166 e 176.111 km² respectivamente); já 2009, 2013 e 2006 foram os anos com menor incidência de áreas queimadas (42.294, 65.876 e 70.330 km² respectivamente) (Figura 13a). Em decorrência destes fatos, 2007 e 2010 apresentaram anomalia padronizada positiva, no valor de 2,01 e 2,16 desvios padrão acima da média do período respectivamente, enquanto 2009 apresentou anomalia padronizada negativa, no valor de 1,36 desvios padrão abaixo da média do período, caracterizando-os como anos extremos de ocorrência de queimadas (Figura 13b). Os anos 2006, 2012 e 2013 não apresentaram anomalia significativa ($Z = -1$ e $Z = 1$). Os anos 2004, 2005, 2015 e 2017 quase não divergiram da média ($Z = 0$), apresentando valores próximos de zero. Os demais anos (2003, 2008, 2011, 2014 e 2016) também apresentaram padrões dentro do normal, todos abaixo da média, sendo que 2003, 2008 e 2011 registraram desvios semelhantes ($Z \sim -0,5$).

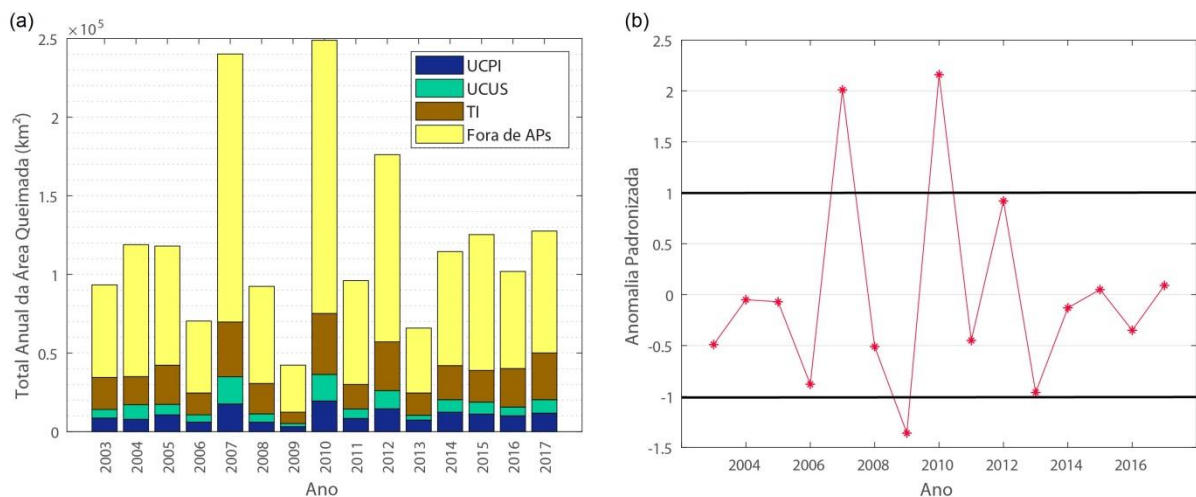


Figura 13. Variabilidade temporal das áreas queimadas no Cerrado no período de 2003 a 2017, de acordo com o MCD64A1 C6 a) total anual das áreas queimadas (km²), apresentando as parcelas referentes às áreas protegidas e às áreas externas a elas; e b) anomalia padronizada interanual das áreas queimadas.

Enquanto 2006, 2009 e 2013 foram classificados como anos neutros de anomalia da temperatura da superfície do mar do oceano Pacífico Equatorial pela agência americana *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), os anos 2007 e 2010 foram de atuação do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño (disponível em https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/past_events.html). O El Niño altera a circulação atmosférica global e, conseqüentemente, o regime de chuvas no Brasil, provocando estiagem prolongada no Norte e Centro-Oeste e intensificando a seca do Nordeste (Marengo, 1992). Em 2007, ocorreu uma seca extrema na região do Cerrado (Brando et al., 2014; Ten Hove et al., 2012), ocasionando o valor anômalo positivo de área queimada neste bioma, visto na Figura 13b. Em 2010, uma das maiores secas da história da Amazônia alcançou a região de transição com o Cerrado (Marengo e Espinoza, 2016), o que resultou no total de área queimada acima da média neste ano. De fato, os anos 2007 e 2010 apresentaram anomalia negativa de precipitação (Araújo et al., 2012).

Embora 2015 também tenha registrado El Niño de forte intensidade (Panisset et al., 2017), não foi um ano extremo em relação ao total de área queimada no Cerrado. Apesar da influência das condições climáticas na vulnerabilidade da vegetação às queimadas, a componente antrópica é o principal agente controlador do fogo na vegetação (Andela et al., 2017; Bowman et al., 2011), uma vez que a queima de biomassa por mecanismos naturais de ignição é menos comum (Andreae, 1991).

Neste contexto, o fator antropogênico não pode ser desconsiderado (Libonati et al., 2015) e, desta forma, procedeu-se com uma análise relativa à presença de APs no Cerrado e a sua relação com o padrão de áreas queimadas. Observa-se que as APs têm grande contribuição nos totais acumulados do Cerrado (Figura 13a), representando 607.082 km² do total geral ou 33%, área queimada da qual as TIs são as principais contribuidoras (Tabela A3 do Anexo). Em TIs, o fogo é utilizado em práticas indígenas tradicionais (Mistry et al., 2005).

Apesar das UCs serem destinadas à conservação e preservação ambiental e dos atributos bióticos, a pressão antrópica e a Política do Fogo Zero adotada por algumas unidades ocasionaram queimadas em grande escala. A prevenção excessiva faz com que o material combustível se acumule e o fogo desencadeie queimadas com maiores proporções, agravadas quando as condições climáticas são favoráveis, além da ausência de brigadas de incêndio em algumas unidades. Cada UC detém das próprias políticas de manejo e restrições de uso e ocupação, e a manutenção e geração da biodiversidade é um assunto bastante complexo (Coelho et al., 2009). No entanto, este não é o foco deste trabalho, que objetiva indicar quais partes protegidas do território sob um poder de gestão são mais afetadas pelo fogo e que

cooperam com perturbações atmosféricas. A adoção de estratégias de queima prescrita pode reverter este cenário de recorrência de grandes incêndios em APs e vegetações naturais durante a estação seca (Barradas, 2017; Nowell et al, 2018), pois funciona como barreira física de modo a impedir a propagação do fogo.

Em relação às APs que registraram maior total acumulado de área queimada em seus territórios, as 5 que apresentaram maior ocorrência em cada grupo estão listadas na Tabela 6 e classificadas em ordem decrescente. As ocorrências se localizam nos estados MA, TO, PI, BA, GO e MT (Figura 14). Na primeira colocação de cada grupo está a UCPI Estação Ecológica (EE) Serra Geral do Tocantins no TO com 33.349 km² queimados, a UCUS Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Preto na BA com 24.852 km² (estas duas unidades estão interligadas e são sobrepostas em alguns trechos, pois as APAs funcionam como zona de amortecimento para UCPIs geralmente) e a TI Parque do Araguaia no TO com 77.660 km². Estes valores representam 4,7, 2,2 e 7,5 vezes a área de cada território respectivamente. Embora pertença a uma categoria de UC bem restritiva, Garda et al. (2011) também destacou a EE Serra Geral do Tocantins como uma das UCs que mais queimam no Brasil.

Tabela 6 – Classificação das cinco áreas protegidas (APs) com maior total acumulado de área queimada e os respectivos valores, em km², por categoria (UCPI, UCUS e TI), no domínio do Cerrado no período de 2003 a 2017.

Classificação	Total de área queimada (km ²) em APs		
	UCPI (km ²)*	UCUS (km ²)*	TI (km ²)
1º	EE Serra Geral do Tocantins (33.349)	APA do Rio Preto (24.852)	Parque do Araguaia (77.660)
2º	PN do Araguaia (29.222)	APA Pouso Alto (17.491)	Pimentel Barbosa (24.616)
3º	PN das Nascentes do Rio Parnaíba (19.590)	APA Ilha do Bananal/Cantão (14.038)	Paresí (22.666)
4º	PE de Mirador (15.976)	APA Jalapão (10.786)	Inãwébohona (19.686)
5º	PE do Araguaia – MT (13.002)	APA Meandros do Araguaia (10.170)	Kraolândia (19.120)

(*) EE = Estação Ecológica; PN = Parque Nacional; PE = Parque Estadual; APA = Área de Proteção Ambiental.

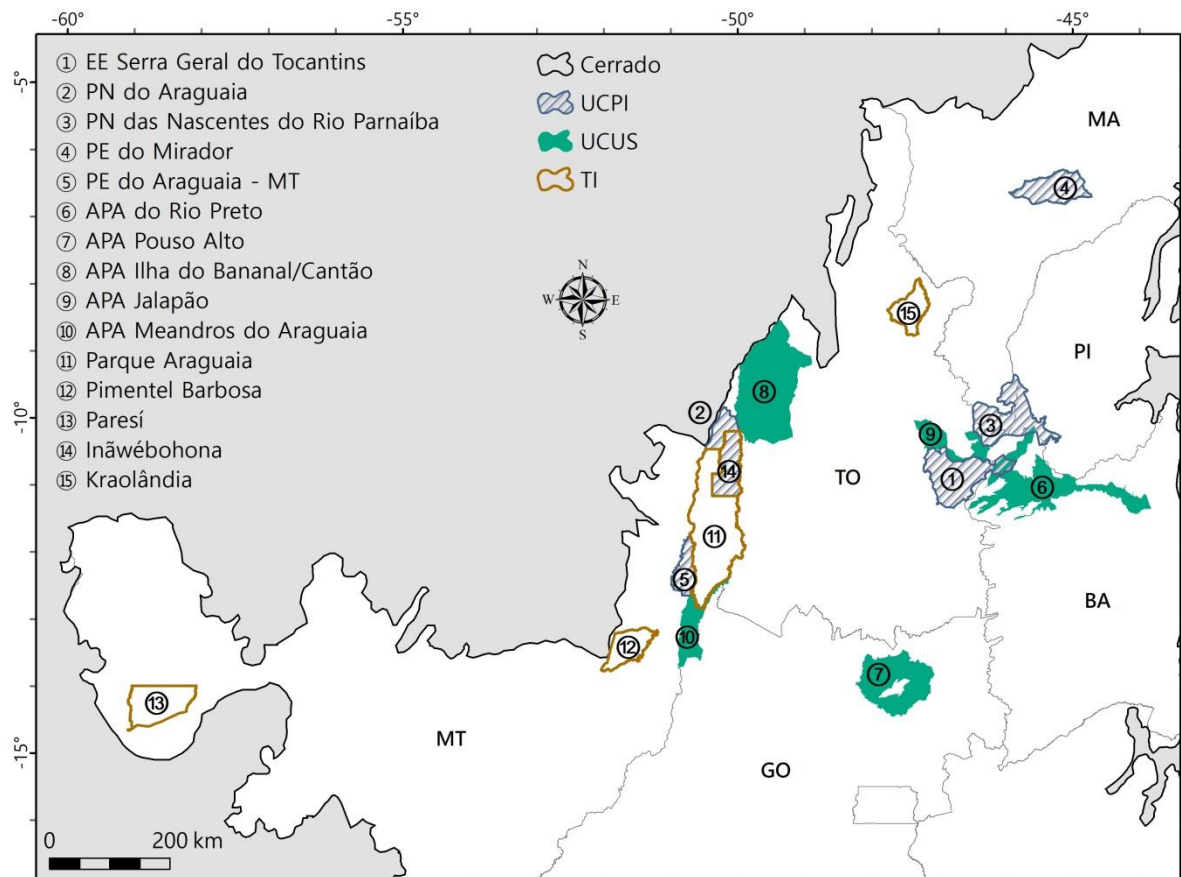


Figura 14. Localização das áreas protegidas do Cerrado com maior total de área queimada acumulado no período de 2003 a 2017.

O aglomerado de UCs presente na Figura 14 na região da fronteira agrícola denominada de MATOPIBA (nome em referência aos estados abrangidos do MA, TO, PI e BA), faz parte do mosaico de UCs do Jalapão, que configura uma importante resistência ao avanço da conversão do Cerrado em agricultura, retrata os sinais da interferência humana (Lapola et al., 2014). Por fim, além do aglomerado de APs entre os estados MT-TO-GO, também há sobreposição com outras unidades ausentes desta lista, demandando atenção: UCPI Refúgio de Vida Silvestre Corixão da Mata Azul está contida na UCUS APA Meandros do Araguaia; TI Utaria Wyhyna/Iròdu Iràna está inserida na UCPI PN do Araguaia.

A Figura 15 apresenta a distribuição espacial das áreas queimadas do Cerrado de 2003 a 2017, de acordo com a anomalia padronizada célula-a-célula para o período. Todos os anos apresentam os dois tipos de anomalia (positiva e negativa) ao longo do Bioma. No geral, a região norte apresenta anomalias negativas e a região sul anomalias positivas, o que está relacionado com o uso e ocupação do solo discutido na Figura 11.

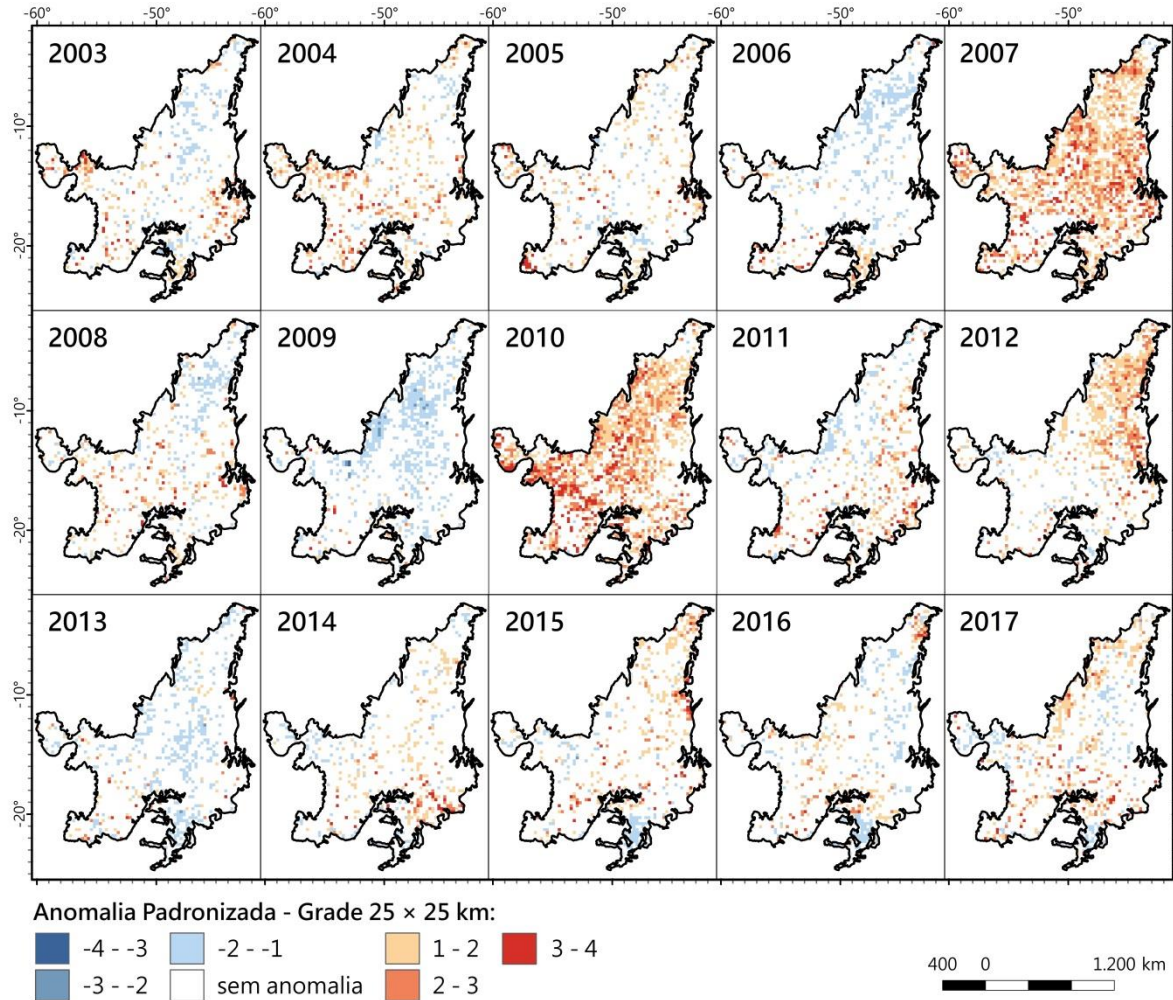


Figura 15. Variabilidade interanual da anomalia padronizada das áreas queimadas em cada célula da grade de 25 x 25 km do Cerrado no período de 2003 a 2017.

Nota-se que os anos 2007 e 2010, os mesmos que apresentaram anomalia anual positiva (Figura 13b), também configuraram um cenário espacial marcante de anomalia positiva por todo o Cerrado (47,3% e 47,5% do bioma respectivamente). Comparando ambos os anos, percebe-se que os setores leste e extremo norte quase não apresentaram nenhuma anomalia em 2010, enquanto que as mesmas regiões em 2007 apresentaram intensa anomalia positiva. Em contrapartida, o setor sudoeste foi menos impactado em 2007. O ano 2012, que se classificou como terceiro ano com maior total de área queimada do período (Figura 13a), também apresentou destacada anomalia positiva (22,6%), principalmente na parte norte, devido à intensa seca enfrentada pela região Nordeste do Brasil neste ano (Marengo et al., 2013). Além disso, estes anos apresentaram as maiores proporções do bioma com algum grau de anomalia (2007 e 2010 com 48,0%, e 2012 com 26,0%).

Assim como a concordância anterior, o resultado espacial para 2009 também firmou o ano como o de maior registro de anomalia negativa (18,5% do bioma, vs. 2,5% de anomalia

negativa), sendo o único ano a apresentar anomalia no intervalo [-3 – -4], embora somente em duas células (0,1%). Seguindo deste resultado, vem 2006 e 2013 como anos mais brandos (11,2% e 13,7% respectivamente). Especialmente, os anos 2005, 2006 e 2014 apresentaram as menores proporções do bioma com algum grau de anomalia (2005 com 15,4%, 2006 com 16,5% e 2014 com 14,5%). Para detalhes das frequências espaciais de anomalia padronizada, acessar Tabela A4 do Anexo.

A distribuição da AQN para cada célula da grade de 25 x 25 km (Figura 16) permite identificar as regiões com maior ocorrência de área queimada no Cerrado. Apesar da nítida variabilidade interanual, os setores centro-oeste (fronteira MT-TO-GO e ponta extrema oeste) e centro-norte (na direção da fronteira MA-TO-PI-BA) do Cerrado apresentam as maiores taxas de AQN em vários anos. Os anos 2007, 2010 e 2012 se destacam como severos nestes setores, com AQN anual acima de 0,2 km² para uma grande quantidade de células. A proporção de área queimada em vegetação remanescente do Cerrado é bastante superior à contribuição das queimadas em superfícies antropizadas (Araújo et al., 2012), que tiveram processo de conversão bem marcado na parte sul do bioma, como vimos no item **5.1.3**.

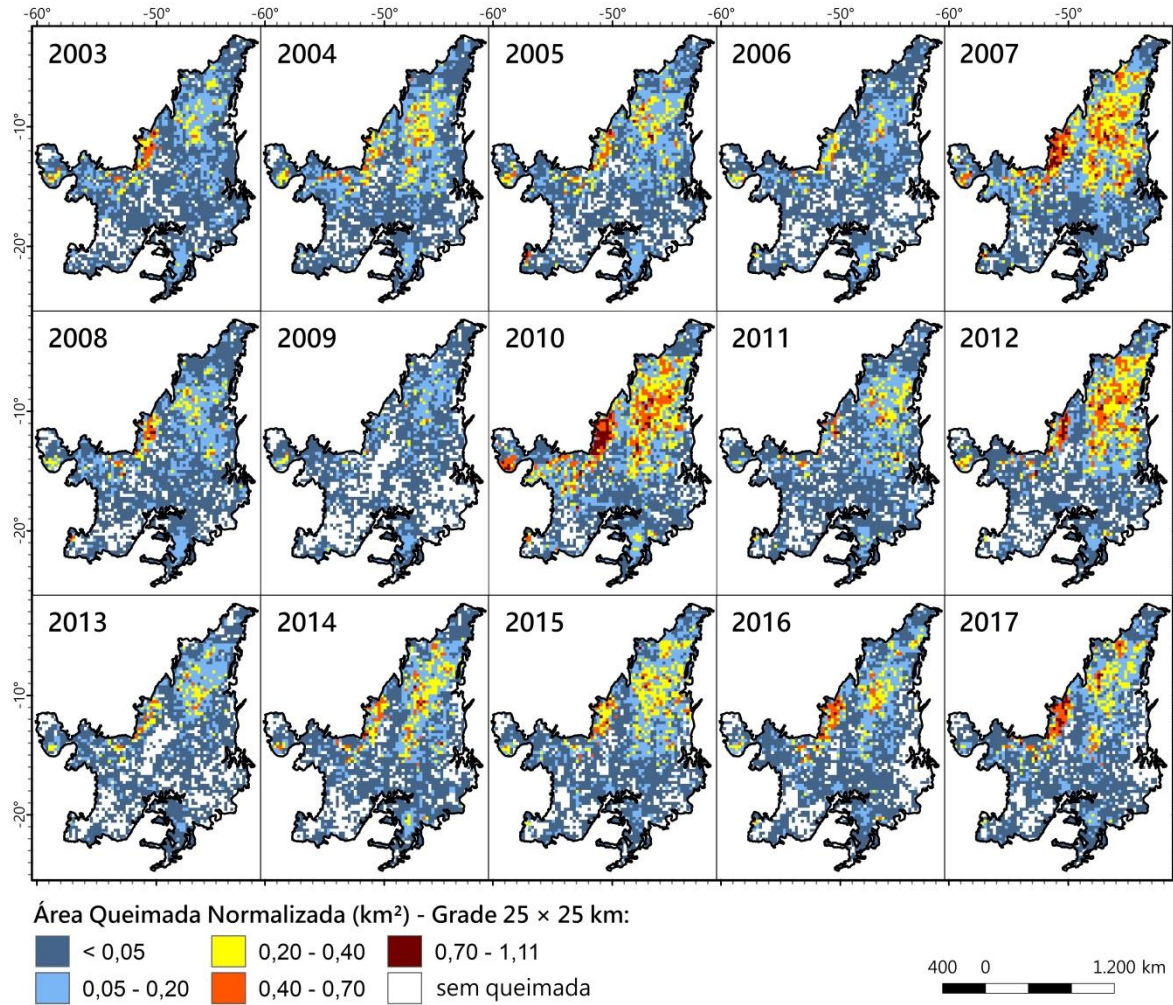


Figura 16. Variabilidade interanual da área queimada normalizada (AQN) em cada célula da grade de 25 x 25 km do Cerrado no período de 2003 a 2017. A AQN é definida como a razão entre o total de área queimada em cada célula e a área da célula (km²).

Uma análise de *cluster* (Figura 17) permitiu a identificação de três piro-regiões homogêneas espacialmente, com regime de fogo semelhante (Figura 17a), assim como seus picos mensais de AQN (Figura 17b), de acordo com a mesma técnica utilizada em estudos anteriores em outras regiões do globo (Sousa et al., 2015; Trigo et al., 2013). A variabilidade sazonal das três piro-regiões é bastante semelhante, com o aumento de área queimada em julho, ápice em setembro, declínio em outubro, voltando a ser baixo a partir de novembro, mostrando uma temporada de queima bem definida durante o inverno até o início da primavera. Entretanto, as magnitudes variam significativamente e principalmente na estação seca. A piro-região (1) é a maior das três em área, porém é aquela que apresenta a menor concentração de área queimada (pico de AQN igual a 0,01 km²). Por outro lado, as piro-regiões (2) e (3) apresentam áreas mais restritas e ao mesmo tempo as maiores proporções de área queimada, com pico em torno de 0,17 e 0,06 km² respectivamente. A Figura 17a nos

informa que, no Cerrado, as intensas áreas queimadas estão direcionadas para três epicentros específicos (fronteira MT-TO-GO, ponta extrema oeste e o centro-norte), que estão sob influência do arco do desmatamento e do MATOPIBA em suas vizinhanças. Observa-se que as APs apontadas na Figura 14 se situam sobre as piro-regiões (2) e (3). Externas a estas regiões, as demais localidades do bioma são pouco impactadas pelo fogo (piro-região 1). Este resultado concorda com a distribuição de vegetação natural do Cerrado da Figura 2.

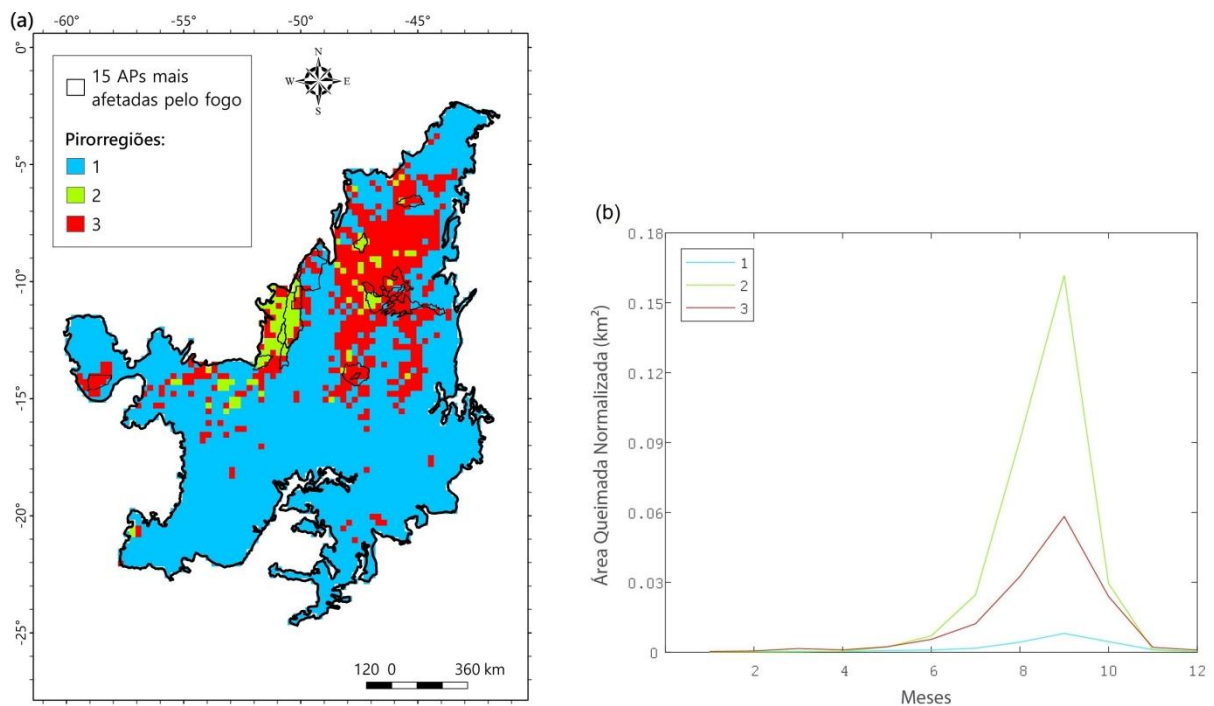


Figura 17. Três *clusters* classificados no Cerrado a) distribuição espacial e b) série média mensal (2003-2017) da área queimada normalizada (AQN). Estas piro-regiões correspondem a regimes de fogo relativamente homogêneos na grade de 25 x 25 km. Os polígonos delimitados em (a) correspondem às áreas protegidas mais afetadas pelo fogo apontadas na Figura 14.

Para completar a caracterização espacial, mostramos a densidade de área queimada nos 15 anos estudados, bem como o mês com maior frequência de pixels classificados como queimada (Figura 18). A Figura 18a vem corroborar a análise das piro-regiões. Embora setembro também apareça como o mês que mais queima em 59% do bioma na análise espacial (Figura 18b), a espacialização dos resultados é importante para vermos as localidades onde não há esse predomínio. Os demais meses da estação seca apareceram em 15%-agosto, 14%-outubro, 3%-julho e 2%-junho.

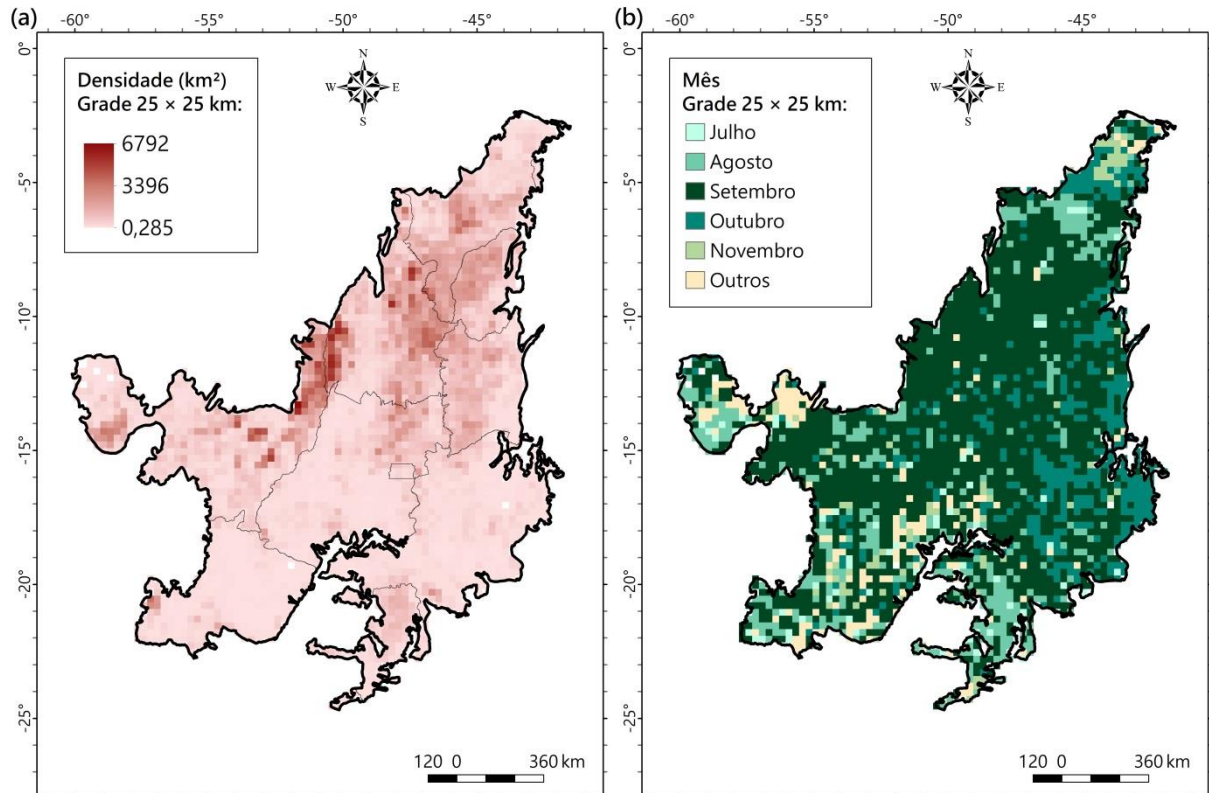


Figura 18. a) Densidade de área queimada (km^2) e b) mês com a maior frequência de pixels classificados como queimada no Cerrado em cada célula da grade de $25 \times 25 \text{ km}$ no período de 2003 a 2017.

6. CONCLUSÕES

Para compreender a dinâmica do fogo e as mudanças nos padrões do Cerrado, a quantificação das incertezas dos produtos de área queimada derivados de satélite deve ser levada em consideração. Neste trabalho, buscou-se avaliar o desempenho das duas últimas coleções do produto global mensal de área queimada MCD64A1 sobre o bioma Cerrado, de grande dimensão territorial e paisagem biodiversa, conectando os resultados com dado de cobertura da superfície. A importância da validação reside na informação das limitações do produto ao usuário e nas tomadas de decisão.

Os resultados evidenciam uma melhora geral em precisão e totalidade do mapeamento da atual C6 em relação à C5.1 anterior, corroborando Giglio et al. (2018) e Alves et al. (2018). Especificamente, das 84 cenas Landsat validadas, 61% aumentaram o acerto, 90% reduziram a omissão, 74% aumentaram a comissão e 92% estimaram maior total de área queimada. A apuração mostrou que os melhores resultados se concentram na parte norte do bioma. Uma alta e estável correlação entre as coleções e os focos ativos VIIRS, com τ entre 0,71 e 0,78 para C6 e 0,68 e 0,73 para C5.1, sugere que a validação de 2015 se amplia aos anos de 2013 a 2016.

Em resumo, nossas análises estratificadas revelam que os resultados de verificação das coleções variam de acordo com a configuração espacial e quantidade total de área queimada, corroborando estudos locais anteriores conduzidos sobre a mesma região (Alves et al., 2018; Libonati et al., 2015). Estes resultados destacam como amostras generalizadas podem influenciar fortemente os padrões de erros de classificação de área queimada em uma grande área de estudo.

A partir dos resultados obtidos na validação, procedeu-se com a caracterização espaço-temporal das queimadas no Cerrado no período de 2003 a 2017. Os anos mais críticos foram 2007 e 2010, e o ano com menor registro foi 2009. Consequentemente, estes anos foram os únicos que apresentaram anomalia padronizada na série temporal, sendo positiva e negativa respectivamente. Com base na média mensal e no resultado espacial acumulado, setembro é o mês mais crítico que o bioma enfrenta em relação às queimadas. Por fim, a parte norte do bioma possui a maior densidade de área queimada, coincidindo com a localização áreas de proteção ambiental, que remetem à conservação da vegetação natural. Entretanto, deve-se ponderar as representações das queimadas localizadas na parte sul do bioma, visto que estas classificações são mais propensas a erro.

O gradiente norte-sul encontrado nos resultados espaciais não é consequência apenas da variação latitudinal, que leva a consideráveis regimes climáticos diferentes, mas principalmente da distribuição irregular e complexa da cobertura da terra no bioma, como observado em estudos anteriores utilizando conjuntos de dados *in situ* e via satélite (Beuchle et al., 2015b; Gomes et al., 2018). Regiões com maior preservação de vegetação nativa e menor uso do solo (Cerrado setentrional) são mais vulneráveis ao fogo, devido ao acúmulo de biomassa seca no período de estiagem e à pressão antrópica em seu entorno. Também, muitas destas regiões são de difícil acesso para o combate do fogo, devido à localização remota. Sendo assim, as cicatrizes de área queimada nestas localidades possuem maior dimensão e padrão contíguo, favorecendo a detecção remota e, conseqüentemente, a redução das omissões. Em comparação, o padrão fragmentado das queimadas em agricultura e pastagem em decorrência de práticas humanas (Cerrado meridional) dificulta a boa acurácia de um produto de resolução espacial grosseira nestas terras, além do manejo do solo para limpeza de terreno que pode contribuir para uma classificação equivocada.

A análise espaço-temporal das áreas queimadas permite compreender o padrão do fogo na vegetação, principalmente no Cerrado, onde o fogo é essencial para a manutenção do bioma e, ao mesmo tempo, uma ameaça pelas intensas atividades humanas. A utilização de um produto de área queimada atual tem significância para uma série temporal longa e

homogênea, uma vez que as versões anteriores vão sendo descontinuadas. No entanto, precisa-se conhecer a qualidade de precisão de mapeamento.

O algoritmo da C6 possui decisões menos exigentes. Estes “relaxamentos” garantiram o sucesso da melhoria de precisão da detecção de queimada pela coleção, inclusive de pequenas manchas de cicatrizes queimadas, embora esse refinamento não seja independente do aumento de comissões com alguns falsos alarmes. Assim, uma representação diária abrangente do regime de fogo em regiões caracterizadas por cicatrizes pequenas e escassamente queimadas, como o sul da savana brasileira, pode exigir uma resolução de imagem mais alta, como o sensor VIIRS/Suomi-NPP 375 m, particularmente nos trópicos.

Ao fornecer, com sucesso, uma quantificação das limitações dos produtos de área queimada longo de todo o bioma Cerrado, este estudo motiva pesquisas adicionais sobre a confiabilidade das estimativas atuais usadas no cálculo de emissões de queimadas, que são aplicadas na elaboração de políticas de decisões. A compreensão de erros pode também levar a futuras projeções regionais mais robustas do regime de fogo, que são cruciais para ações de adaptação e mitigação. Finalmente, esforços crescentes estão sendo feitos por agências federais e estaduais para controlar os processos de desmatamento e incêndios antropogênicos de vegetação no Brasil, a fim de manter o Cerrado como um reservatório de carbono global, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e preservar a biodiversidade. Essas preocupações apontam para a necessidade de fornecer informações confiáveis sobre queimadas aos cientistas, gerentes de recursos e formuladores de políticas.

7. REFERÊNCIAS

AHERN, F.J.; GOLDAMMER, J.G.; JUSTICE, C.O. Global and regional vegetation fire monitoring from space: planning a coordinated international effort. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, 2001.

ALENCAR, A.A.; BRANDO, P.M.; ASNER, G.P.; PUTZ, F.E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. *Ecological Applications*, v. 25, p. 1493–1505, 2015.

ALONSO-CANAS, I.; CHUVIECO, E. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. *Remote Sensing of Environments*, v. 163, p. 140–152, 2015.

ALVES, D. B.; PÉREZ-CABELLO, F.; FEBRER-MARTÍNEZ, M. Accuracy assessment of the latest generations of MODIS burned area products for mapping fire scars on

a regional scale over Campos Amazônicos Savanna Enclave (Brazilian Amazon). *Journal Applied of Remote Sensing*, v. 12, 2018.

ANDELA, N., MORTON, D.C., GIGLIO, L., CHEN, Y., VAN DER WERF, G.R., KASIBHATLA, P.S., DEFRIES, R.S., COLLATZ, G.J., HANTSON, S., KLOSTER, S., BACHELET, D., FORREST, M., LASSLOP, G., LI, F., MANGEON, S., MELTON, J.R., YUE, C., RANDERSON, J.T. A human-driven decline in global burned area. *Science*, v. 356, p. 1356–1362, 2017.

ARAÚJO, F.M., 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.

ARAÚJO, F.M., 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, p. 1929–1946, 2012.

ARMENTERAS-PASCUAL, D.; RETANA-ALUMBREROS, J.; MOLOWNY-HORAS, R.; ROMAN-CUESTA, R. M.; GONZALEZ-ALONSO, F.; MORALES-RIVAS, M. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, p. 279–289, 2011.

BARRADAS, A. C. S. A gestão do fogo na Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional em Biodiversidade em Unidades de Conservação, Escola Nacional de Botânica Tropical, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 123 p.

BEUCHLE, R., GRECCHI, R.C., SHIMABUKURO, Y.E., SELIGER, R., EVA, H.D., SANO, E., ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, v. 58, p. 116–127, 2015.

BINAGHI, E.; BRIVIO, P.A.; GHEZZI, P.; RAMPINI, A. A fuzzy set-based accuracy assessment of soft classification. *Pattern Recognition Letters*, v. 20, p. 935–948, 1999.

BOSCHETTI, L. Methodology for accuracy assessment of global scale burned area maps derived from satellite images. Tese de Doutorado em Geodésia e Geomática XVII Ciclo, Politecnico Di Milano, 2005. 92 p.

BOSCHETTI, L.; EVA, H.D.; BRIVIO, P.A.; GRÉGOIRE, J.M. Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. *Geophysical Research Letters*, v. 31(21), 2004.

BOSCHETTI, L., STEHMAN, S. V., ROY, D.P. A stratified random sampling design in space and time for regional to global scale burned area product validation. *Remote Sensing of Environments*, v. 186, p. 465–478, 2016.

BOSCHETTI, M., STROPPIANA, D., BRIVIO, P.A. Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of spectral indices from high-resolution satellite images. *Earth Interactions*, v. 14, 2010.

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, J.B.; MORITZ, M.A.; PRENTICE, I.C.; ROOS, C.I.; SCOTT, A.C.; SWETNAM, T.W.; VAN DER WERF, G.R.; PYNE, S.J. Fire in the Earth System. *Science*, v. 324, p. 481–484, 2009.

BOWMAN, D., BALCH, J., ARTAXO, P., BOND, W.J., COCHRANE, M.A., D'ANTONIO, C.M., DEFRIES, R., JOHNSTON, F.H., KEELEY, J.E., KRAWCHUK, M.A., KULL, C.A., MACK, M., MORITZ, M.A., PYNE, S., ROOS, C.I., SCOTT, A.C., SODHI, N.S., SWETNAM, T.W. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, v. 38, p. 2223–2236, 2011.

BRANDO, P.M.; BALCH, J.K.; NEPSTAD, D.C.; MORTON, D.C.; PUTZ, F.E.; COE, M.T.; SILVERIO, D.; MACEDO, M.N.; DAVIDSON, E.A.; NOBREGA, C.C.; ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B.S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014.

CARRANZA, T., BALMFORD, A., KAPOS, V., MANICA, A. Protected area effectiveness in reducing conversion in a rapidly vanishing ecosystem: The Brazilian Cerrado. *Conservation Letters*, v. 7, p. 216–223, 2014.

CASTRO-NEVES, B. M.. Efeito de Queimadas em áreas de Cerrado Stricto Sensu e na biomassa de raízes finas. Tese de Doutorado em Ecologia, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. p. 82.

CHANG, D.; SONG, Y. Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 114, 2009.

CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P.; PALACIOS, A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, p. 5103-5110, 2002.

CHUVIECO, E., LIZUNDIA-LOIOLA, J., PETTINARI, M.L., RAMO, R., PADILLA, M., MOUILLOT, F., LAURENT, P., STORM, T., HEIL, A., PLUMMER, S. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250m

reflectance bands and thermal anomalies. *Earth System Science Data Discuss*, v. 512, p. 1–24, 2018.

CHUVIECO, E.; OPAZO, S.; SIONE, W.; DEL VALLE, H.; ANAYA, J.; DI BELLA, C.; CRUZ, I.; MANZO, L.; LÓPEZ, G.; MARI, N.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; MORELLI, F.; SETZER, A.; CSISZAR, I.; KANPANDEGI, J.A.; BASTARRIKA, A.; LIBONATI, R. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications*, v. 18, p. 64–79, 2008.

CHUVIECO, E.; VENTURA, G.; MARTÍN, M.P.; GÓMEZ, I. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, v. 94, p. 450–462, 2005.

COELHO, M. C. N.; CUNHA, L. H.; MONTEIRO, M. A. Unidades de Conservação: Populações, recursos e territórios. *Abordagens da Geografia e da Ecologia Política*. In: GUERRA, A. J. T.; COELHO, M. C. N. (eds) *Unidades de conservação: Abordagens e Características Geográficas*, p. 67-111, 2009.

COUTINHO, L.M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: GOLDAMMER, J.G. (eds) *Fire in the tropical biota*. New York, Springer–Velarg, p. 82–105, 1990.

CRUTZEN, P. J.; HEIDT, L. E.; KRASNEC, J. P.; POLLOCK, W. H.; SEILER, W. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl and COS. *Nature*, v. 282, p. 253–256, 1979.

DIAS, L.C.P., PIMENTA, F.M., SANTOS, A.B., COSTA, M.H., LADLE, R.J. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, v. 22, p. 2887–2903, 2016.

dos SANTOS, J.F.C., ROMEIRO, J.M.N., DE ASSIS, J.B., TORRES, F.T.P., GLERIANI, J.M. Potentials and limitations of remote fire monitoring in protected areas. *Science of the Total Environment*, v. 616–617, p. 1347–1355, 2018.

DURIGAN, G., RATTER, J.A. The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, v. 53, p. 11–15, 2016.

FERREIRA, A.J.D.; COELHO, C.O.A.; RITSEMA, C.J.; BOULET, A.K.; KEIZER, J.J. Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach. *Catena*, v. 74, n. 3, p. 273–285, 2008.

FLANNIGAN, M.D.; STOCKS, B.J.; WOTTON, B.M. Climate change and forest fires. *Science of The Total Environment*, v. 262, p. 221–229, 2000.

FLANNIGAN, M.D.; WOTTON, B.M. Climate, Weather, and Area Burned. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (eds) Forest fires: behavior and ecological effects. p. 351–373, 2001.

FORNACCA, D., REN, G., XIAO, W. Performance of Three MODIS Fire Products (MCD45A1, MCD64A1, MCD14ML), and ESA Fire_CCI in a Mountainous Area of Northwest Yunnan, China, Characterized by Frequent Small Fires. *Remote Sensing*, v. 9(11), 2017.

FRANÇA, H. Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA. Tese de Doutorado em Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000. 121p.

FRIEDL, M. A.; MCIVER, D. K.; HODGES, J.; ZHANG, X. Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A. H.; WOODCOCK, C. E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, v. 83(1), p. 287–302, 2002.

FRIEDL, M.A.; SULLA-MENASHE, D.; TAN, B.; SCHNEIDER, A.; RAMANKUTTY, N.; SIBLEY, A.; HUANG, X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 1, p. 168–182, 2010.

Funai – Fundação Nacional do Índio. Terras Indígenas. 2018. Disponível em: <<http://www.funai.gov.br/index.php/shape>>. Acesso em: abr.2018.

GIGLIO, L., BOSCHETTI, L., ROY, D.P., HUMBER, M.L., JUSTICE, C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environments*, v. 217, p. 72–85, 2018.

GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D.P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C.O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 2, p. 408–420, 2009.

GIGLIO, L., RANDERSON, J.T., VAN DER WERF, G.R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, v. 118, p. 317–328, 2013.

GIGLIO, L., RANDERSON, J.T., VAN DER WERF, G.R., KASIBHATLA, P.S., COLLATZ, G.J., MORTON, D.C., DEFRIES, R.S. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences*, v. 7, p. 1171–1186, 2010.

GIGLIO, L., SCHROEDER, W., JUSTICE, C.O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environments*, v. 178, p. 31–41, 2016.

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

GOLDING, N.; BETTS, R. Fire risk in Amazonia due to climate change in the HadCM3 climate model: Potential interactions with deforestation. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22(4), 2008.

GOMES, L., MIRANDA, H.S., BUSTAMANTE, M.M.C. How can we advance the knowledge on the behavior and effects of fire in the Cerrado biome? *Forest Ecology and Management*, v. 417, p. 281–290, 2018.

GRAESSER, J., AIDE, T.M., GRAU, H.R., RAMANKUTTY, N. Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, v. 10, 2015

GREGOIRE, J.M.; TANSEY, K.; SILVA, J.M.N. The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, p. 1369–1376, 2003.

HALL, J. V., LOBODA, T. V., GIGLIO, L., MCCARTY, G.W. A MODIS-based burned area assessment for Russian croplands: Mapping requirements and challenges. *Remote Sensing of Environments*, v. 184, p. 506–521, 2016.

HANTSON, S., ARNETH, A., HARRISON, S., KELLEY, D., PRENTICE, I., RABIN, S., ARCHIBALD, S., MOUILLOT, F., ARNOLD, R., ARTAXO, P., CIAIS, P., HICKLER, T. The status and challenge of global fire modelling. *Biogeosciences*, v. 13(11), p. 3359–3375, 2016.

HOFFMANN, W.A., JACONIS, S.Y., MCKINLEY, K.L., GEIGER, E.L., GOTSCH, S.G., FRANCO, A.C. Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna-forest boundaries. *Austral Ecology*, v. 37, p. 634–643, 2012.

HUMBER, M.L., BOSCHETTI, L., GIGLIO, L., JUSTICE, C.O. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. *International Journal of Digital Earth*, p. 1–25, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de Biomas e de Vegetação. 2004. Disponível em:

<<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: nov.2018.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 2018.

JIN, Y.; ROY, D. P. Fire-induced albedo change and its radiative forcing at the surface in northern Australia. *Geophysical Research Letters*, 32, p. 1–4, 2005.

JUSTINO, F., MÉLO, A.S.; SETZER, A.; SISMANOGLU, R.; SEDIYAMA, G.C.; RIBEIRO, G.A.; MACHADO, J.P.; STERL, A. Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Climatic Change*, v. 106, p. 285–302, 2011.

KORONTZI, S.; ROY, D.P.; JUSTICE, C.O.; WARD, D.E. Modeling and sensitivity analysis of fire emissions in southern Africa during SAFARI 2000. *Remote Sensing of Environment*, v. 92, p. 255–275, 2004.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 3, p. 217-231, 1988.

KUNKEL, K.E. Surface energy budget and fuel moisture. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (eds) *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*. Academic Press: San Diego, CA, p. 303–350, 2001.

LAPOLA, D.M., MARTINELLI, L.A., PERES, C.A., OMETTO, J.P.H.B., FERREIRA, M.E., NOBRE, C.A., AGUIAR, A.P.D., BUSTAMANTE, M.M.C., CARDOSO, M.F., COSTA, M.H., JOLY, C.A., LEITE, C.C., MOUTINHO, P., SAMPAIO, G., STRASSBURG, B.B.N., VIEIRA, I.C.G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. *Nature Climate Change*, v. 4, p. 27–35, 2014.

LARIS, P.S. Spatiotemporal problems with detecting and mapping mosaic fire regimes with coarse-resolution satellite data in savanna environments. *Remote Sensing of Environments*, v. 99, p. 412–424, 2005.

LASHOF, D.A. The contribution of biomass burning to global warming: an integrated assessment. In: LEVINE, J.S. (eds) *Global biomass burning*. MIT Press. Cambridge, p. 441–444, 1996.

LATORRE, M.L.; ANDERSON, L.O.; SHIMABUKURO, Y.E.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Sensor MODIS: Características gerais e aplicações. *Espaço & Geografia*, v. 6, n. 1, p. 91–121, 2003.

LE PAGE, S.E.; SIEGERT, F.; RIELEY, J.O.; BOEHM, H.D.V.; JAYA, A.; LIMIN, S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, v. 420, p. 61–65, 2002.

LEVINE, J.S.; WESLEY III, R.C.; WINSTEAD, E.L.; THINEHART, R.P.; CAHOON JR., D.R.; SEBACHER, D.K.; SEBACHER, S.; STOCKS, B.J. Biomass burning: combustion emissions, satellite imagery, and biogenic emissions. In Levine J.S. (eds) *Global biomass burning*. MIT Press. Cambridge, p. 264–271, 1996.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.; SETZER, A.; MORELLI, F.; MELCHIORI, A. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μm MODIS Imagery. *Remote Sensing*, v. 7, p. 15782–15803, 2015.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C.C.; PEREIRA, J.M.C.; PERES, L.F. Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 831–843, 2010.

LOVELAND, T.R., BELWARD, A.S. The igbp-dis global 1km land cover data set, discover: First results. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, p. 3289–3295, 1997.

MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 1992.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. *Journal of Climate*, 2013.

MARENGO, J. A. ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 1033–1050, 2016.

MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. Case Studies of Extreme Climatic Events in the Amazon Basin. American Meteorological Society, 1993.

MATAVELI, G.A.V., SILVA, M.E.S., PEREIRA, G., DA SILVA CARDOZO, F., SHINJI KAWAKUBO, F., BERTANI, G., CEZAR COSTA, J., DE CÁSSIA RAMOS, R., DA 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, p. 125–144, 2018.

MELCHIORI, E.A.; SETZER, A.W.; MORELLI, F.; LIBONATI, R.; CÂNDIDO, P.A.; JESÚS, S.C. A Landsat-TM/OLI algorithm for burned areas in the Brazilian Cerrado – preliminary results. VII International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (eds), 2014.

MELCHIORRE, A., BOSCHETTI, L. Global Analysis of Burned Area Persistence Time with MODIS Data. *Remote Sensing*, v. 10(75), 2018.

MISTRY, J., BERARDI, A., ANDRADE, V., KRAHÔ, T., KRAHÔ, P., LEONARDOS, O. Indigenous fire management in the cerrado of Brazil: The case of the Krahô of Tocantíns. *Human Ecology*, v. 33, p. 365–386, 2005.

MOUILLOT, F., SCHULTZ, M.G., YUE, C., CADULE, P., TANSEY, K., CIAIS, P., CHUVIECO, E. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014.

NOGUEIRA, J.M.P., RAMBAL, S., 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. (42), 2017b.

NOGUEIRA, J., RUFFAULT, J., CHUVIECO, E., MOUILLOT, F. Can We Go Beyond Burned Area in the Assessment of Global Remote Sensing Products with Fire Patch Metrics? *Remote Sensing*, v. 9(7), 2017a.

NOWELL, H., HOMES, C., ROBERTSON, K., TESKE, C., HIERS, J. A New Picture of Fire Extent , Variability , and Drought Interaction in Prescribed Fire Landscapes : Insights From Florida Government Records. *Geophysical Research Letters*, p. 7874–7884, 2018.

PADILLA, M., OLOFSSON, P., STEHMAN, S. V., TANSEY, K., CHUVIECO, E. Stratification and sample allocation for reference burned area data. *Remote Sensing of Environments*, v. 203, p. 240–255, 2017.

PADILLA, M., STEHMAN, S. V., CHUVIECO, E. Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sens. Environments*, v. 144, p. 187–196, 2014.

PADILLA, M., STEHMAN, S. V., RAMO, R., CORTI, D., HANTSON, S., OLIVA, P., ALONSO-CANAS, I., BRADLEY, A. V, TANSEY, K., MOTA, B., PEREIRA, J.M., CHUVIECO, E. Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote Sensing Environments*, v. 160, p. 114–121, 2015

PANISSET, J., LIBONATI, R., GOUVEIA, C.M.P., Machado-Silva, F., FRANÇA, D.A., FRANÇA, J.R.A., PERES, L.F. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*, 2017.

PEREIRA, J.M.C. Remote sensing of burned areas in tropical savannas. *International Journal of Wildland Fire*, v. 12, p. 259–270, 2003.

PEREIRA, M.G.; MALAMUD, B.D.; TRIGO, R.M.; ALVES, P.I. The history and characteristics of the 1980-2005 Portuguese rural fire database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 11, p. 3343–3358, 2011.

PEREIRA, A., PEREIRA, J.M.C., LIBONATI, R., OOM, D., SETZER, A.W., MORELLI, F., MACHADO-SILVA, F., DE CARVALHO, L.M.T. Burned area mapping in the Brazilian Savanna using a one-class support vector machine trained by active fires. *Remote Sensing*, v. 9, 2017.

PEREIRA, M.G.; TRIGO, R.M.; DACAMARA, C.C.; PEREIRA, J.M.C.; LEITE, S.M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 129, p. 11–25, 2005.

PESSOA, O.A.A.; BAPTISTA, G.M.M.; ALMEIDA, T; MENESES, P.R. Monitoramento da reflectância espectral após extinção do fogo e uma proposta para a detecção de áreas queimadas em vegetação campestre de cerrado. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 67/6, p. 1131–1143, 2005.

PIROMAL, R.A.S.; RIVERA-LOMBARDI, R.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 38(1), p. 77–84, 2008.

PIVELLO, V.R. Fire management for biological conservation in the Brazilian Cerrado. In: Mistry, J.; Berardi, A. (eds.) *Savannas and dry forests - linking people with nature*. Ashgate, Hants, p. 129–154, 2006.

PIVELLO, V.R. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecology*, v. 7, 24–39, 2011.

PRINS, E.M.; FELTZ, J.M.; MENZEL, W.P.; WARD, D.E. An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, p. 31821–31835, 1998.

PYNE, F.J.; ANDREWS, P.L.; LAVEN, R.D. *Introduction to wildland fire*. Wiley, New York, 1996.

RAMO, R., CHUVIECO, E. Developing a Random Forest Algorithm for MODIS Global Burned Area Classification. *Remote Sensing*, v. 9, 2017.

RANDERSON, J.T., CHEN, Y., VAN DER WERF, G.R., ROGERS, B.M., MORTON, D.C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, v. 117, 2012.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (eds) *Cerrado: ambiente e flora*. Brasília, Embrapa Cerrados, p. 87–166, 1998.

ROY, D.P.; BOSCHETTI, L.; JUSTICE, C.O.; JU, J. The Collection 5 MODIS burned area product: Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3690–3707, 2008.

ROY, D.P.; BOSCHETTI, L.; TRIGG, S.N. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 3, p. 112–116, 2006.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. *Remote Sensing*, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SÁ, A.C.L.; PEREIRA, J.M.C.; VASCONCELOS, M.J.P.; SILVA, J.M.N; RIBEIRO, N.; AWASSE, A. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24, p. 1783–1796, 2003.

SANTÍN, C., DOERR, S.H. Fire effects on soils: the human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016.

SCHROEDER, W., CSISZAR, I., MORISETTE, J. Quantifying the impact of cloud obscuration on remote sensing of active fires in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environments*, v. 112, p. 456–470, 2008.

SCHROEDER, W., OLIVA, P., GIGLIO, L., CSISZAR, I.A. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environments*, 2014.

SELLERS, P. J.; BOUNOUA, L.; COLLATZ, G. J.; RANDALL, D. A.; DAZLICH, D. A.; LOS, S. O.; BERRY, J. A.; FUNG, I.; TUCKER, C. J.; FIELD, C. B.; JENSEN, T. G. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, v. 271, p. 1402–1406, 1996.

SILVA, P.; BASTOS, A.; DACAMARA, C.C.; LIBONATI, R. Future Projections of Fire Occurrence in Brazil Using EC–Earth Climate Model. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 3, p. 288–297, 2016.

SIMON, M.; PLUMMER, S.; FIERENS, F.; HOELZEMANN, J.J.; ARINO, O. Burnt area detection of global scale using ATSR-2: the GLOBESCAR products and their qualification. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 109, 2004.

SKINNER, W.R.; FLANNIGAN, M.D.; STOCKS, B.J.; MARTELL, D.L.; WOTTON, J.B.; TODD, J.B.; MASON, J.A.; LOGAN, K.A.; BOSCH, E.M. A 500 hPa synoptic wildland fire climatology for large Canadian forest fires, 1959–1996. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 71, p. 157–169, 2002.

SONG, X.-P., HANSEN, M.C., STEHMAN, S. V., POTAPOV, P. V., TYUKAVINA, A., VERMOTE, E.F., TOWNSHEND, J.R. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018.

SOUSA, A.M.O.; PEREIRA, J.M.C.; SILVA, J.M.N. Evaluating the performance of multitemporal image compositing algorithms for burned area analysis. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24 (6), p. 1229–1236, 2003.

SOUSA, M. P.; TRIGO, R. M.; PEREIRA, M .G; BEDIA, J.; GUTIÉRREZ, J. M. Different approaches to model future burnt area in the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, V. 202, p. 11–25, 2015.

SULLA-MENASHE, D., FRIEDL, M.A. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product, p. 1–18, 2018.

SWETNAM, T.W.; BETANCOURT, J.L. Fire-Southern Oscillation Relations in the Southwestern United States. *Science*, v. 249, p. 1017–1020, 1990.

TANSEY, K.; GREGOIRE, J.M.; STROPPIANA, D.; SOUSA, A.; SILVA, J.; PEREIRA, J.M.C.; BOSCHETTI, L.; MAGGI, M. BRIVIO, P.A.; FRASER, R.; FLASSE, S.; ERSHOV, D.; BINAGHI, E.; GRAETZ, D.; PEDUZZI, P. Vegetation burning in the year 2000: global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 109, 2004.

TEN HOEVE, J.E.; REMER, L.A.; CORREIA, A.L.; JACOBSON, M.Z. Recent shift from forest to savanna burning in the Amazon Basin observed by satellite. *Environmental Research Letters*, v. 7, 2012.

TRIGO, R. M.; SOUSA, P. M.; PEREIRA, M. G.; RASILLA, D.; GOUVEIA, C. M. Modelling wildfire activity in Iberia with different atmospheric circulation weather types. *International Journal Of Climatology*, 2013.

USGS – United States Geological Survey. Land Processes Distributed Active Archive Center. User Guide for the MODIS Land Cover Type Product (MCD12Q1), 2012. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q1>.

USGS – United States Geological Survey. Land Processes Distributed Active Archive Center. MODIS Overview, 2014. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis>.

VAN DER WERF, G.R., RANDERSON, J.T., GIGLIO, L., COLLATZ, 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 MARLE, M.J.E., FIELD, R.D., VAN DER WERF, G.R., ESTRADA DE WAGT, I.A., HOUGHTON, R.A., RIZZO, L. V., ARTAXO, P., TSIGARIDIS, K. Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973–2014). *Global Biogeochemical Cycles*, v. 31, p. 24–38, 2017.

WANG, W., CAO, C., BAI, Y., BLONSKI, S., SCHULL, M.A. Assessment of the NOAA S-NPP VIIRS geolocation reprocessing improvements. *Remote Sensing*, v. 9, 2017.

WILKS, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences – Second Edition*. Academic Press, 627 p., 2006.

WWF – World Wildlife Fund. Observatório de UCs. 2018. Disponível em: <<http://observatorio.wwf.org.br/mapa/>>. Acesso em: abr.2018.

ZHU, C., KOBAYASHI, H., KANAYA, Y., SAITO, M. Size-dependent validation of MODIS MCD64A1 burned area over six vegetation types in boreal Eurasia: Large underestimation in croplands. *Scientific Reports*, v. 7, 2017.

ANEXO

Tabela A1 – Número de imagens utilizadas na validação, por cena, e os meses correspondentes.

Cena	Meses validados						Nº de imagens
	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	
217_071							2
217_074							2
218_067							3
218_069							4
218_070							3
218_071							3
218_072							3
219_062							3
219_063							3
219_064							2
219_065							3
219_067							4
219_068							5
219_069							4
219_070							6
219_071							2
219_072							2
219_073							3
219_074							3
219_075							3
220_063							2
220_066							4
220_067							4
220_068							5
220_070							2
220_072							2
220_073							4
220_074							4

220_075							6
220_076							3
221_064							2
221_065							4
221_066							5
221_067							5
221_068							5
221_069							5
221_071							4
221_072							6
221_073							6
221_074							3
221_075							3
221_076							2
222_064							3
222_066							4
222_067							3
222_068							5
222_069							4
222_070							5
222_071							3
222_072							3
222_075							2
223_064							2
223_065							4
223_066							2
223_069							3
223_070							6
223_071							3
223_072							3
223_073							4
223_074							2
223_075							2

224_067							5
224_068							3
224_069							3
224_071							3
224_072							3
224_073							3
224_075							2
225_069							6
225_070							5
225_071							5
225_072							3
225_073							3
225_074							4
225_075							4
226_069							3
226_070							4
227_068							3
227_070							3
227_071							4
228_068							2
228_070							4
229_069							4
229_070							4

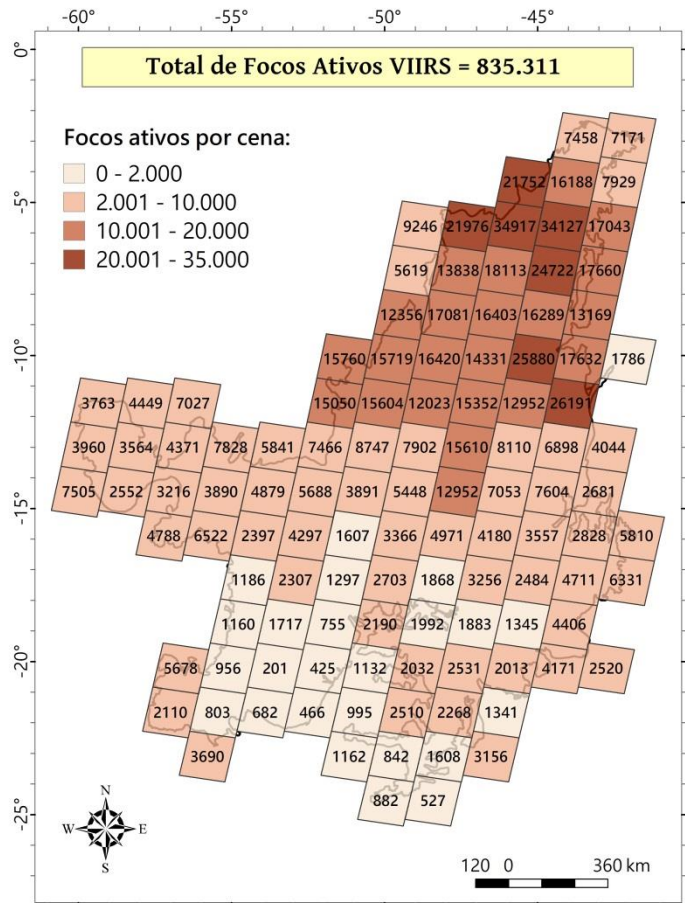


Figura A1. Total de focos ativos detectados pelo sensor VIIRS/Suomi-NPP 375 m em cada cena Landsat do Cerrado em 2015.

Tabela A2 – Resultados quantitativos da avaliação de precisão das coleções 5.1 e 6 do produto de área queimada MCD64A1 (C5.1 e C6) para o Cerrado em 2015: Índice Crítico de Acerto (ICA, %), Erro de Omissão (EO, %), Erro de Comissão (EC, %) e Viés (V) por cena Landsat validada. A área total das cicatrizes de referência (ha) e o grupo ao qual cada cena pertence também são apresentados na tabela.

Cena	ICA (%)		EO (%)		EC (%)		V		Área total das cicatrizes de referência (ha)	Grupo
	C5.1	C6	C5.1	C6	C5.1	C6	C5.1	C6		
217_071	19	16	75	78	51	60	0,51	0,55	3.227	2
217_074	10	9	68	58	87	89	2,53	3,97	2.147	2
218_067	33	37	39	36	57	53	1,43	1,35	762	1
218_069	54	55	30	28	28	30	0,97	1,02	3.944	2
218_070	48	47	44	43	22	26	0,72	0,76	15.241	2
218_071	44	45	36	32	41	43	1,07	1,18	2.636	2
218_072	35	31	38	38	56	61	1,41	1,59	41.660	2
219_062	17	22	77	69	59	56	0,56	0,70	9.714	2
219_063	27	28	66	58	41	52	0,58	0,88	8.699	2
219_064	22	25	76	69	32	41	0,36	0,53	6.515	3
219_065	42	49	52	42	22	24	0,61	0,76	11.655	3
219_067	78	77	11	12	14	14	1,03	1,02	4.933	3
219_068	78	78	10	9	15	15	1,07	1,07	2.089	4
219_069	61	61	26	24	23	25	0,96	1,02	7.532	2
219_070	76	76	13	13	13	14	1,00	1,01	12.473	2
219_071	32	34	42	37	58	57	1,39	1,46	21.476	2
219_072	59	59	26	26	25	25	0,99	0,99	5.937	2
219_073	12	20	87	68	48	66	0,25	0,93	1.201	1
219_074	25	31	71	59	36	45	0,46	0,75	6.017	2
219_075	2	3	93	72	96	96	1,98	8,01	18.707	1
220_063	24	27	65	55	55	59	0,79	1,11	13.835	3
220_066	53	55	34	28	27	30	0,91	1,02	13.042	3
220_067	33	35	47	38	53	56	1,12	1,41	26.516	4
220_068	66	67	10	9	28	28	1,26	1,26	5.430	3
220_070	47	47	12	10	50	50	1,77	1,81	56.199	2
220_072	27	22	61	55	53	70	0,83	1,49	33.395	2
220_073	3	6	97	92	51	77	0,07	0,33	25.531	1
220_074	18	17	68	54	69	79	1,03	2,19	22.457	2
220_075	5	7	92	82	85	90	0,50	1,84	12.839	2
220_076	14	11	78	74	73	83	0,81	1,54	112.722	1
221_064	41	40	34	27	49	52	1,29	1,53	19.739	4
221_065	46	49	44	35	27	34	0,76	0,98	40.915	3
221_066	39	44	56	47	23	28	0,57	0,73	1.851	3
221_067	58	63	29	18	24	26	0,93	1,11	27.944	3
221_068	56	56	22	17	34	36	1,18	1,29	15.321	3
221_069	18	19	78	76	49	49	0,43	0,47	26.553	3
221_071	23	26	68	63	57	54	0,74	0,81	3.736	2
221_072	26	24	68	60	43	63	0,57	1,09	39.044	1
221_073	24	22	65	60	55	67	0,77	1,21	86.275	1

221_074	15	17	78	63	69	76	0,71	1,58	17.043	2
221_075	3	6	96	89	88	86	0,29	0,77	404.867	2
221_076	3	5	95	87	91	92	0,53	1,72	3.085	1
222_064	47	49	33	26	38	41	1,08	1,24	95.118	4
222_066	39	42	49	42	37	40	0,80	0,96	14.053	3
222_067	54	52	18	16	39	42	1,34	1,44	147.980	3
222_068	57	53	25	22	30	37	1,06	1,23	104.558	3
222_069	51	55	34	30	29	27	0,93	0,95	84.459	2
222_070	44	45	48	41	25	34	0,69	0,89	4.713	2
222_071	14	28	81	56	62	56	0,50	1,00	21.973	2
222_072	17	19	74	67	69	69	0,84	1,07	229.729	2
222_075	7	14	92	82	3	55	0,08	0,38	5.946	1
223_064	22	24	69	64	57	59	0,72	0,89	110.310	2
223_065	31	37	63	52	32	37	0,54	0,77	104.107	2
223_066	30	36	55	46	53	47	0,95	1,02	6.800	3
223_069	75	74	10	10	18	19	1,10	1,11	10.475	2
223_070	35	35	52	49	44	46	0,85	0,93	218.154	2
223_071	32	31	51	50	52	54	1,02	1,07	5.973	1
223_072	19	16	61	58	73	80	1,44	2,09	60.417	1
223_073	29	27	51	39	59	67	1,20	1,84	38.588	1
223_074	1	5	97	84	98	93	1,60	2,40	94.491	1
223_075	7	6	91	90	73	87	0,32	0,75	8.892	1
224_067	37	36	13	11	60	62	2,20	2,35	12.021	3
224_068	55	56	17	14	37	39	1,31	1,41	40.583	3
224_069	72	73	8	7	23	23	1,19	1,21	36.432	2
224_071	54	54	11	9	42	42	1,52	1,59	290.778	2
224_072	33	24	58	49	40	68	0,69	1,61	44.059	2
224_073	55	36	32	22	25	59	0,90	1,92	23.706	1
224_075	1	3	92	93	99	95	7,07	1,40	6.810	1
225_069	49	53	34	29	34	32	0,99	1,04	163.519	2
225_070	60	61	32	29	16	19	0,81	0,88	42.167	2
225_071	49	52	36	27	32	35	0,95	1,12	19.858	2
225_072	51	49	37	28	27	38	0,87	1,17	29.294	1
225_073	22	38	74	44	39	46	0,43	1,03	2.261	1
225_074	12	15	82	76	71	72	0,63	0,85	242.996	1
225_075	16	15	74	54	71	81	0,89	2,41	3.747	1
226_069	24	29	65	47	56	61	0,81	1,36	19.637	2
226_070	54	55	23	20	35	36	1,18	1,25	106.664	2
227_068	14	15	51	55	83	82	2,99	2,46	112.392	2
227_070	11	11	63	60	86	87	2,61	3,05	185.510	2
227_071	32	33	26	21	63	64	2,01	2,20	21.746	2
228_068	13	16	77	60	78	79	1,04	1,90	121.121	2
228_070	67	73	26	16	12	15	0,85	0,98	308.112	2
229_069	53	55	39	33	18	25	0,74	0,90	118.986	2
229_070	63	60	24	18	21	30	0,96	1,18	2.170	2
Média	35	36	51	45	47	52	1,05	1,36	-	-
Desvio padrão	21	20	26	24	23	23	0,84	0,94	-	-

Tabela A3 – Área queimada mensal, em km², no Cerrado de 2003 a 2017. As extremidades da tabela apresentam o total mensal (TM), o total anual (TA), o total anual em UCPI (TUCPI), o total anual em UCUS (TUCUS) e o total anual em TI (TTI), em km², e as respectivas contribuições relativas ao total geral (%).

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	TM:
Jan	372	293	226	803	848	268	396	1.162	458	761	343	419	1.153	791	480	8.774 (0,5%)
Fev	640	273	373	371	924	357	688	1.457	173	1.146	2.022	498	755	1.044	1.152	11.873 (0,6%)
Mar	939	2.564	570	498	2.358	695	2.129	945	1.266	1.037	1.003	826	728	1.389	2.098	19.047 (1,0%)
Abr	977	770	940	822	936	619	610	1.963	1.223	760	470	730	410	1.457	765	13.450 (0,7%)
Mai	2.447	2.625	2.372	2.529	3.522	1.995	1.414	4.255	2.328	1.860	1.229	1.618	1.426	2.125	1.645	33.391 (1,8%)
Jun	5.390	4.921	3.221	3.432	8.718	3.169	2.561	9.286	3.535	3.500	2.270	3.973	3.425	3.954	2.708	64.062 (3,5%)
Jul	10.050	8.614	9.361	7.957	17.652	5.880	5.410	23.414	6.034	13.545	5.209	7.347	6.382	12.953	7.103	146.912 (8,0%)
Ago	19.220	21.273	27.768	20.953	61.542	16.649	10.915	66.864	18.994	46.353	14.598	29.351	18.913	29.631	20.367	423.389 (23,0%)
Set	39.782	57.340	43.291	27.228	102.667	31.159	13.097	115.276	53.356	76.003	26.962	36.196	47.730	31.934	60.343	762.365 (41,6%)
Out	11.456	15.306	25.998	3.025	33.926	26.384	3.063	20.166	6.373	28.341	9.904	30.819	36.720	12.218	28.153	291.851 (15,9%)
Nov	1.326	3.449	3.498	1.769	5.925	4.409	1.396	2.626	1.198	1.507	1.446	1.737	4.611	3.791	1.581	40.269 (2,2%)
Dez	741	1.462	397	941	1.147	814	615	1.511	1.069	1.297	420	991	3.071	576	1.179	16.233 (0,9%)
TA:	93.341 (5,1%)	118.890 (6,5%)	118.015 (6,4%)	70.330 (3,8%)	240.166 (13,1%)	92.398 (5,0%)	42.294 (2,3%)	248.925 (13,6%)	96.006 (5,3%)	176.111 (9,6%)	65.876 (3,6%)	114.504 (6,3%)	125.325 (6,8%)	101.863 (5,6%)	127.572 (7,0%)	1.831.617
TUCPI:	8.643	7.840	10.725	6.105	17.672	6.039	3.158	19.530	8.370	14.555	7.387	12.415	11.184	10.100	11.768	155.491 (8,5%)
TUCUS:	5.416	9.335	6.615	4.609	17.213	5.270	2.035	16.833	6.033	11.535	3.018	7.889	7.618	5.527	8.512	117.457 (6,4%)
TTI:	20.386	17.808	24.867	13.859	34.856	19.335	7.187	38.777	15.635	31.033	14.190	21.719	20.139	24.506	29.838	334.134 (18,2%)

Tabela A4 – Frequência espacial anual da anomalia padronizada (Z, %) de área queimada no Cerrado no período de 2003 a 2017, baseada na grade de 25 x 25 km, por grau de intensidade: -4 – -3; -3 – -2, -2 – -1; 1 – 2; 2 – 3; e 3 – 4.

Frequência Z / Ano	-4 – -3 (%)	-3 – -2 (%)	-2 – -1 (%)	Total Z < -1 (%)	1 – 2 (%)	2 – 3 (%)	3 – 4 (%)	Total Z > 1 (%)	Total Z (%)
2003	0,0	0,0	6,9	6,9	6,7	2,5	1,0	10,2	17,2
2004	0,0	0,0	3,5	3,5	10,0	3,6	1,1	14,7	18,2
2005	0,0	0,0	4,1	4,1	8,2	1,9	1,3	11,4	15,4
2006	0,0	0,0	11,2	11,2	3,9	1,0	0,4	5,3	16,5
2007	0,0	0,0	0,7	0,7	27,0	15,4	4,8	47,3	48,0
2008	0,0	0,1	6,8	6,9	7,0	2,5	1,0	10,6	17,5
2009	0,1	0,7	17,7	18,5	1,7	0,5	0,2	2,4	20,9
2010	0,0	0,0	0,5	0,5	25,0	16,1	6,4	47,5	48,0
2011	0,0	0,0	6,7	6,7	7,1	3,9	1,3	12,3	18,9
2012	0,0	0,1	3,4	3,5	15,4	6,3	0,9	22,6	26,0
2013	0,0	0,1	13,6	13,7	2,1	0,8	0,4	3,3	16,9
2014	0,0	0,0	4,8	4,8	6,8	2,0	0,9	9,7	14,5
2015	0,0	0,1	4,9	4,9	8,4	3,1	1,3	12,7	17,6
2016	0,0	0,0	7,6	7,6	6,3	2,3	0,5	9,1	16,8
2017	0,0	0,0	6,4	6,4	10,5	3,3	1,8	15,7	22,0

PUBLICAÇÕES

Publicações em Anais de Simpósios/Congressos/Conferências e em Revistas ao longo do curso de mestrado (março/2016 a novembro/2018):

- i) **RODRIGUES, J. A.**; LIBONATI, R.; PERES, L. F.; SETZER, A. Mapeamento de Áreas Queimadas em Unidades de Conservação da Região Serrana do Rio de Janeiro Utilizando o Satélite Landsat-8 Durante a Seca de 2014. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 41, p. 318-327, 2018.
 - ii) **RODRIGUES, J.A.**; SANTOS, F. L. M.; LIBONATI, R.; PERES, L.F.; PEREIRA, A. A.; SETZER, A. W. MCD64A1 COLLECTION 6 VALIDATION OVER BRAZILIAN CERRADO. In: European Geosciences Union General Assembly, 2018, Viena. Geophysical Research Abstracts, v. 20, 2018.
 - iii) SANTOS, F. L. M.; **RODRIGUES, J.A.**; LIBONATI, R.; PERES, L.F.; PEREIRA, A. A.; SETZER, A. W. New generation of NPP-VIIRS sensor contribution to burned area mapping in Brazil. In: European Geosciences Union General Assembly, 2018, Viena. Geophysical Research Abstracts, v. 20, 2018.
 - iv) **RODRIGUES, J. A.**; SANTOS, F. L. M.; FRANÇA, D. A.; PEREIRA, A. A.; LIBONATI, R. Validação e refinamento dos produtos de área queimada baseados em dados MODIS para a região do Jalapão/TO. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 6834-6841, 2017.
 - v) **RODRIGUES, J. A.**; LIBONATI, R.; PERES, L. F. Utilização do satélite Landsat-8 para estimativa de área queimada na Região Serrana do Rio de Janeiro durante a seca de 2014/2015. In: XIX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2016, João Pessoa. Anais XIX CBMET 2016, 2016.
- Aceito:
 - i) **RODRIGUES, J. A.**; LIBONATI, R.; NOGUEIRA, J.M.P.; SANTOS, F. L. M.; ROSA, A.S.; Martins, G.; PERES, L. F.; PEREIRA, J.M.C.; SETZER, A.; GIGLIO, L., SCHROEDER, W. How well do global burned area products represent the fire patterns in the Brazilian Savannas biome? An accuracy assessment of the MCD64 collections. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019. QUALIS A2– Geociências.