Validação e refinamento dos produtos de área queimada baseados em dados MODIS para a região do Jalapão/TO

Julia Abrantes Rodrigues [1]
Filippe Lemos Maia Santos [1]
Daniela de Azeredo França [2]
Allan Arantes Pereira [3]
Renata Libonati [1]

[1] Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
CEP 21941-916 – Rio de Janeiro – RJ, Brasil
abrant.julia@gmail.com, filmaias@hotmail.com, renata.libonati@igeo.ufrj.br

[2] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
CEP 12227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil
daniela.franca@cptec.inpe.br

[3] Instituto Federal Sul de Minas – IFSUL
CEP 37713-100 – Poços de Caldas, MG – Brasil
allan.pereira@ifsuldeminas.edu.br

Abstract. This paper presents a continuity of previous studies describing the validation of two low-resolution Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) burned area (BA) products: AQM (1 km) and MCD64A1 (500 m), provided by INPE and NASA, respectively, to the expanding period of 10 years (2005 – 2014) over Cerrado ecosystem region, located in Parque Estadual do Jalapão, in the east of Tocantins. The accuracy assessment was performed using BA maps derived from medium-resolution (30 m) Landsat imagery. Results show that overall accuracy is similar in MCD64 and AQM products, but MCD64 product presents very high occurrence of omission errors (> 60%), however has low commission errors (< 10%). The opposite occurs with the AQM product, which has a balance in commission errors and omission cases. The Dice Coefficient (DC) index was used to evaluate the similarity between the classifier and the reference map in terms of the number of common burned pixels. The AQM product presents DC values higher than MCD64 product, showing a greater overlap between fraction of pixels classified as burned to those truly burned in the reference map. An improved version of AQM was tested and validated over the years of 2010 and 2014, showing a clear reduction of commission errors.

Palavras-chave: remote sensing, verification, fire, Landsat, sensoriamento remoto, verificação, fogo.

1. Introdução

As ocorrências de queimadas e seus impactos são um problema global. Além de modificarem e destruírem ecossistemas, o fogo, somente por desflorestamento, é responsável por cerca de um quinto do CO_2 emitido na atmosfera (Bowman et al., 2009), já representando uma significativa parcela sem contabilizar os demais gases que perturbam e poluem o ar. As estimativas são, normalmente, baseadas na quantidade de biomassa consumida, e isso requer um mapeamento preciso das áreas queimadas, bem como conhecer a integralidade da combustão e ter o balanço de biomassa pré-fogo (Palacios-Orueta et al., 2005). A necessidade de informações sobre a modificação da superfície proporcionou uma evolução das técnicas de sensoriamento remoto e a crescente busca pelos seus dados (Mouillot et al., 2014).

Visando o maior detalhamento da superfície, o uso de sensores de média/alta resolução tem sido geralmente indicado no mapeamento de áreas queimadas em escala local, e até mesmo em escala global, tanto por causa dos requisitos mais rigorosos, como pela crescente disponibilidade de tais imagens, especialmente após a disponibilidade pública das imagens

Landsat (Bastarrika et al., 2011). Entretanto, o lado negativo dos satélites da série Landsat para esta finalidade é a baixa resolução temporal de 16 dias, além de suas imagens serem frequentemente afetadas pela presença de nuvens, o que muitas vezes acarreta uma diferença de vários meses na data de aquisição das cenas, inibindo a detecção de muitas cicatrizes.

A dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação do solo e do regime de fogo em regiões como o Cerrado é acentuada. Nestas regiões, assim como na maioria das savanas tropicais, o sinal radiométrico deixado pelas queimadas é facilmente atenuado ou eliminado pelos agentes naturais como chuva e vento (Pereira, 2003), bem como o rápido processo de rebrota da vegetação, dificultando a detecção via sensoriamento remoto (Pessoa et al., 2015). Logo, a defasagem temporal entre o tempo decorrido entre o incêndio e o imageamento da área afetada requer ser a menor possível, visando à boa qualidade do produto mapeado.

Sendo assim, apesar do pouco detalhamento da superfície, os produtos de área queimada de baixa resolução espacial geram uma estimativa global por abrangerem áreas de grande extensão, além de serem compostos por várias cenas mensais devido à alta frequência temporal da ordem de 1-2 dias do sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e da qualidade espectral das bandas quanto à interferência da atmosfera. Durante os últimos anos, tem-se observado um grande esforço no desenvolvimento de produtos que mapeiam as áreas queimadas em escala global (Grégoire et al., 2003; Tansey et al., 2004, Simon et al., 2004, Roy et al., 2006; Roy et al., 2008; Giglio et al., 2006, entre outros). Entretanto, segundo Boschetti et al. (2004) e Korontzi et al. (2004), grandes discrepâncias persistem nos produtos globais tanto na quantificação da extensão da área queimada quanto na sua localização espacial e temporal. Adicionalmente, a exatidão destes produtos varia ainda de forma significante de acordo com o bioma. As limitações dos algoritmos atuais que geram estimativas de áreas queimadas a nível global, sugerem o desenvolvimento de algoritmos regionais que levem em consideração os desafios descritos acima. Considerando a escala regional, foi desenvolvido o algoritmo AQM-MODIS (Libonati et al., 2015a) especificamente para as características regionais da América do Sul, com 1 km de resolução espacial.

Neste contexto, validar o algoritmo regional AQM é de extrema importância para conhecer o grau de confiabilidade (precisão) e oferecer informações para melhorias. Portanto, o objetivo deste trabalho é validar o produto regional de área queimada AQM-MODIS sobre a região do Jalapão/TO para o período de 2005 a 2014, utilizando cicatrizes mapeadas a partir de sensores de média resolução, e comparar os resultados com o produto global MCD64 (Giglio et al., 2006), dando continuidade ao trabalho iniciado por Libonati et al. (2015a; 2015b).

2. Dados e Metodologia

2.1. Área de estudo

A área de estudo está situada na região do Jalapão/TO, onde está inserida na cena Landsat 221/67 (Figura 1). O bioma presente na região do estudo é o Cerrado, considerado um *hotspot* mundial de biodiversidade (MMA, 2016), e também bastante ameaçado pelo fogo antrópico. Dos seis biomas existentes no Brasil, é o que registra a maior extensão anual de área queimada no período estudado (INPE, 2016).

Na região da área de estudo, encontra-se o mosaico de áreas protegidas do Jalapão, considerado o maior mosaico de Unidades de Conservação (UCs) do bioma Cerrado, com a presença de distintas fitofisionomias e alta diversidade de espécies, sendo que muitas delas ameaçadas de extinção. Dentre as UCs de proteção integral estão: a Estação Ecológica (ESEC) Serra Geral do Tocantins, a Estação Ecológica do Rio Preto, o Monumento Natural (MN) Canyons e Corredeiras do Rio Sono, o Parque Estadual (PE) do Jalapão e o Parque

Nacional (PN) das nascentes do Rio Parnaíba. Já as UCs de uso sustentável: as Áreas de Proteção Ambiental (APA) Serra da Tabatinga, APA do Jalapão e APA do Rio Preto, as Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) Catedral do Jalapão, Fazenda Calixto e Mina d'Água. No total, estas UCs cobrem uma área de 3.280.045 ha.

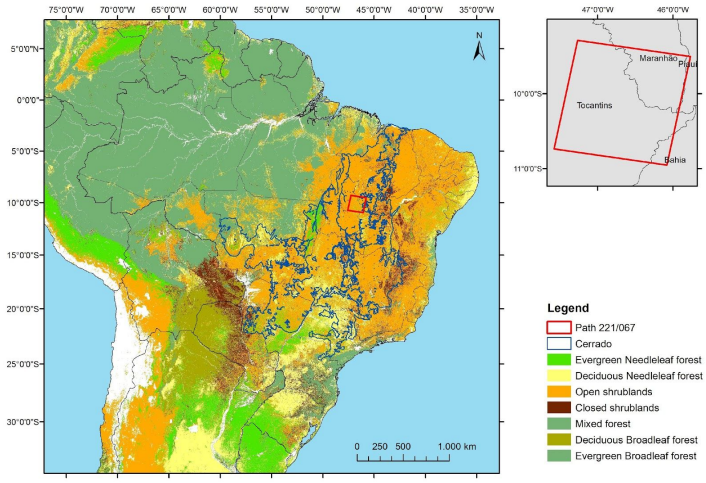


Figura 1. Localização da cena Landsat 221/67 em vermelho e do bioma Cerrado em azul. O mapa de uso de cobertura do solo de 2010 é proveniente do produto MODIS-IGBP.

2.2 Dados de área queimada

Os produtos mensais de área queimada de baixa resolução espacial a serem validados (dados classificados) são gerados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pelo Grupo de Monitoramento de Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), nomeadamente MCD64A1 e AQM respectivamente, obtidos a partir de imagens do sensor MODIS. Enquanto o MCD64 (Giglio et al., 2006) é produto oficial global fornecido em *tiles,* com dados desde agosto de 2000 e resolução de 500 m, o AQM (Libonati et al., 2015a) é um produto mensal com resolução de 1 km aplicado para a América do Sul desde 2005. Tais dados foram baixados gratuitamente através da Reverb (NASA) e da Universidade de Maryland pelos endereços eletrônicos http://reverb.echo.nasa.gov, ftp://user@ba1.geog.umd.edu e ftp://fuoco.geog.umd.edu/db/MCD64A1, enquanto que os dados do AQM foram disponibilizados pelo INPE para os anos 2005 a 2014.

Os dados oficiais requerem um pré-processamento que inclui realizar mosaico dos *tiles* referentes à área de estudo, redimensionamento para 1 km e reprojeção para coordenadas geográficas para serem compatíveis com os dados AQM, com o auxílio da ferramenta *MODIS Reprojection Tool*.

2.3 Dados de referência de área queimada INPE/Landsat

Os dados de referência para a validação são cicatrizes de área queimada geradas pelo Grupo de Monitoramento de Queimadas do INPE, obtidas a partir de imagens dos sensores a bordo dos satélites Landsat 5 e 8, nomeadamente *Thematic Mapper* (TM) e *Operational Land Imager* (OLI), com máximo de 10% de cobertura de nuvens. Baseiam-se na aplicação de um algoritmo semi-automático e na mudança multitemporal entre imagens (Melchiori et al., 2014). Os resultados da avaliação local dependem não só do algoritmo classificador, mas também dos dados utilizados como referência. Por isso, é fundamental que os dados de referência sejam confiáveis e englobem o mesmo período de estudo.

Diferentemente dos estudos de Libonati et al. (2015a; 2015b), não houve restrição quanto ao tamanho das cicatrizes. Na Tabela 1, é possível visualizar as datas das imagens utilizadas na para se obter os mapas de referência para os mesmos anos dos dados classificados.

Tabela 1. Datas das imagens Landsat utilizadas para se obter os mapas de referência de cicatrizes de área queimada.

	Ano	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2013**	**2014**
Data	**Maio**		23	26						
	Jun		8, 24	27	13		3, 19		27	30
	Jul	7, 23	26	13, 29	15, 31	2	5		13, 29	16
	Ago	8, 24	11, 27	14, 30	16	3, 19	6, 22	9	14, 30	1
	Set	9	28	15	17		7, 23	10		2, 18
	Out			1				28		4

2.4 Metodologia

Para cada ano, os meses considerados na validação foram de acordo com as datas das cicatrizes existentes mostradas acima: 2005 (julho e agosto), 2006 (junho a setembro), 2007 (junho a setembro), 2008 (julho a setembro), 2009 (julho e agosto), 2010 (junho a setembro), 2011 (agosto a outubro), 2013 (julho e agosto) e 2014 (julho a setembro).

A partir da tabela de contingência (Tabela 2), é possível verificar a qualidade das previsões através de medidas de acurácia (Wilks, 2006), dentre elas, acerto global (OA), erro de comissão (CE), erro de omissão (OE), viéis (B) e Coeficiente Sorensen-Dice (DC).

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

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

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

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

$$DC = \frac{2a}{2a+b+c} \quad (5)$$

Tabela 2. Tabela de contingência para verificação da ocorrência ou não de queimadas.

Mapa de referência / Produto Área Queimada	**Queimada**	**Não queimada**	
Queimada	a	b	a+b
Não queimada	c	d	c+d
	a +c	b+d	a+b+c+d

Como a teoria descrita acima não leva em consideração a diferença de resolução entre o sensor utilizado para a classificação e o sensor utilizado para gerar os dados de referência, as

medidas foram calculadas de acordo com a técnica desenvolvida por Binaghi et al. (1999). Neste caso, a concordância/discordância entre os dados de referência (30 m) e os dados classificados (1 km) é calculada levando em consideração a proporção de área queimada/não queimada dos dados de referência que se encontra em cada pixel de 1 km. Consequentemente, os erros de omissão ou comissão que seriam gerados pela tabela de contingência tradicional serão eliminados.

Por exemplo, se um pixel é classificado como queimado e de acordo com os dados de referência possui 40% de sua área como queimada, então este pixel terá uma proporção de 0.4 como acerto de queimada e uma proporção de 0.6 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).

3. Resultados e Discussão

Os resultados das medidas de verificação para os produtos de área queimada, nomeadamente AQM e MCD64, são apresentados na Tabela 3. Os valores de OA do MCD64 foram superiores aos do AQM em todos os anos, exceto em 2011 que o valor foi igual (82%), ficando em média 4% maior. Porém, no âmbito de detecção de áreas queimadas, o evento mais relevante é o da sua ocorrência, e esta medida inclui todos os acertos, tanto de queimada quanto de não queimada (espaços em branco no mapa). Visto isso, analisam-se também os valores de DC, que consideram a similaridade entre o classificador e o mapa de referência em relação ao número de pixels queimados comuns, como visto na seção anterior. Os valores de DC do AQM foram superiores ao do MCD64 em cinco anos, sendo as maiores diferenças em 2005 (62% *vs*. 54%), 2006 (64% *vs*. 53%), 2009 (60% *vs*. 51%) e 2011 (70% *vs*. 44%); em 2007, a diferença foi de apenas 1%. Em 2014, os valores se apresentaram iguais. Nos demais anos, o MCD64 se comportou melhor nesta medida (50% *vs*. 43% em 2008; 77% *vs*. 72% em 2010; e 68% *vs*. 66% em 2013), porém com menor discrepância.Os valores muito baixos de CE (inferiores a 10%) e elevados de OE obtidos pelo MCD64 traduzem-se em valores de B significativamente inferiores a 1, sendo o mais alto correspondente a 0.65. Um comportamento oposto é demonstrado pelo produto AQM, onde os valores mais altos (baixos) de CE (OE) resultam em maiores valores de B, sendo o menor correspondente a 0.63 em 2008, e com uma ligeira tendência para superestimação (valores de B ligeiramente maiores do que 1) nos anos 2009, 2013 e 2014 com valores de B correspondentes a 1.31, 1.29 e 1.20 respectivamente. Vale destacar que as comissões apresentadas pelo AQM se encontram, na grande maioria, nas bordas das cicatrizes queimadas, e que o caso isolado em 2008 também ocorreu com o MCD64. Portanto, as comissões do AQM não são necessariamente falsos alarmes, mas sim uma forma de sobrestimativa do tamanho das cicatrizes. Ressalta-se que CE e OE também podem ocorrer devido a erros de georreferenciamento, bastando que uma imagem esteja georreferenciada incorretamente para que o composto temporal também esteja.

Com base nos resultados, o algoritmo do produto AQM foi refinado (AQMr) e validado para 2010 e 2014, e obteve melhores resultados de maneira geral, apresentando 3% de melhoria em OA de ambos os anos, além de 9% em OE e 6% em DC para 2010, 8% em CE e 0.3 em B para 2014, como se pode observar nas Figuras 2 e 3. Resumidamente, OA melhorou em ambos os anos; CE manteve-se constante em 2010 e melhorou em 2014; OE e DC melhoraram apenas em 2010; e B melhorou apenas em 2014. As alterações no algoritmo do produto AQM resultaram também em mudanças significativas no total anual de área queimada, que passou de 1.663.016 ha para 1.030.474 ha, em 2010, e de 1.298.173 ha para 788.501 ha, em 2014, tornando este produto mais próximo da referência Landsat, cujos totais anuais de área queimada corresponderam a 875.972 ha e 591.716 ha, em 2010 e 2014 respectivamente. Ao passo que o produto MCD64 apresentou os menores totais anuais de área

queimada (676.629 ha em 2010 e 434.241 ha em 2014), o que deve estar relacionado aos altos OE encontrados para este produto.

Tabela 3. Resultados das métricas derivadas da tabela de contingência para os produtos AQM e MCD64.

		OA (%)	*CE (%)*	*OE (%)*	*B*	*DC (%)*
2005	**AQM**	87.12	33.40	41.21	0.88	62.45
	MCD64	90.85	4.82	61.95	0.40	54.36
2006	**AQM**	82.25	24.51	44.25	0.74	64.14
	MCD64	85.30	1.21	64.01	0.36	52.76
2007	**AQM**	77.08	13.71	42.98	0.66	68.66
	MCD64	81.28	1.55	47.57	0.53	68.42
2008	**AQM**	86.28	44.22	64.77	0.63	43.19
	MCD64	90.90	9.95	64.92	0.39	50.50
2009	**AQM**	90.16	47.19	30.63	1.31	59.97
	MCD64	95.33	10.32	63.95	0.40	51.43
2010	**AQM**	80.09	12.38	39.42	0.69	71.63
	MCD64	85.49	2.61	36.23	0.65	77.08
2011	**AQM**	81.61	23.89	35.06	0.85	70.09
	MCD64	82.15	2.98	71.59	0.29	43.95
2013	**AQM**	86.02	41.28	24.06	1.29	66.23
	MCD64	93.77	1.78	47.41	0.53	68.50
2014	**AQM**	80.60	31.51	17.93	1.20	74.67
	MCD64	89.62	3.04	39.16	0.63	74.77

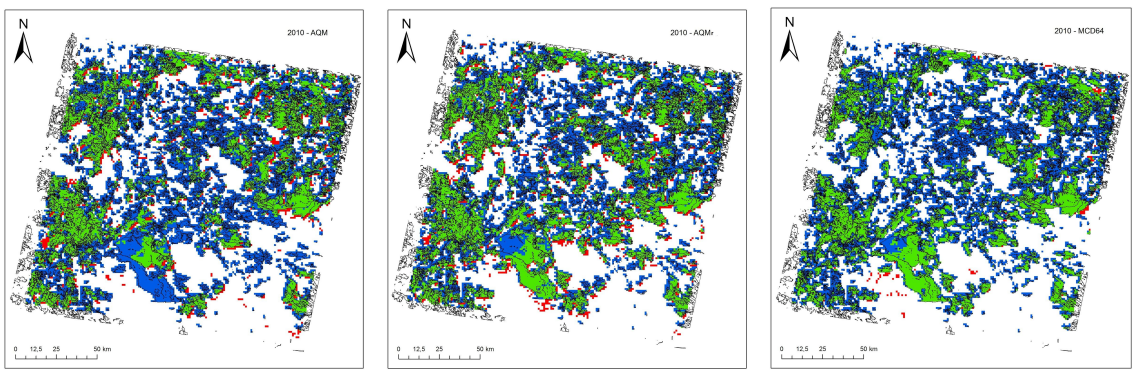


Figura 2. Mapas mostrando pixels de acerto de área queimada (verde), omissão (azul) e comissão (vermelho) do produto AQM (esquerda), AQM refinado (centro) e MCD64 (direita) para o ano de 2010.

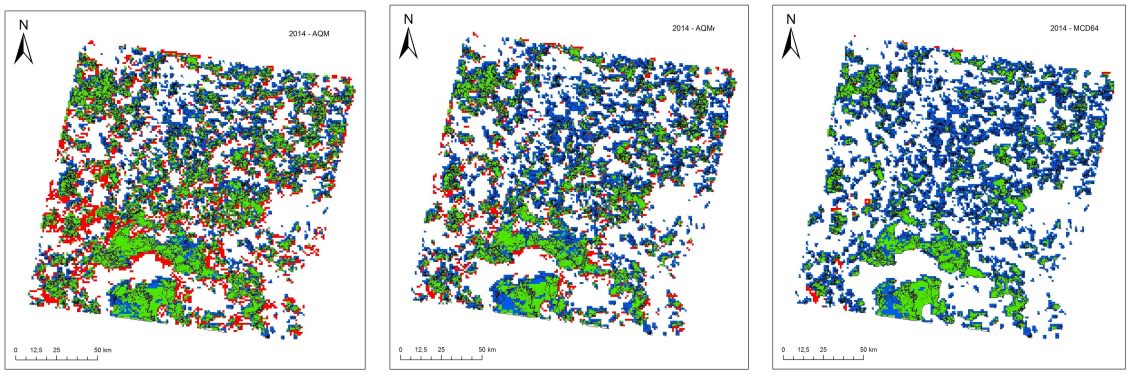


Figura 3. Idem a Figura 2, mas para o ano de 2014.

4. Conclusões

Nota-se que o produto oficial da NASA apresenta baixos CE, isto é, fornece relativamente poucos falsos alarmes de queimada. Por outro lado, este produto apresentou altos OE (entre 31 e 71%). O produto AQM, por outro lado, apresenta um balanço entre CE e OE, mostrando ser mais eficiente na detecção da maior parte das cicatrizes (DC). A versão AQM refinada obteve melhores resultados para os dois anos analisados, porém é necessária uma série temporal de estudo maior para confirmar este padrão.

Os resultados da avaliação local também são dependentes das características espaciais das queimadas como tamanho e regularidade (forma). Tendo em conta a resolução espacial de 1km dos produtos de área queimada apresentados, os resultados dos mapas de estimativa de área queimada são limitados a queimadas com extensão próxima ou superior a 1 km². Portanto, num regime de fogo com grandes áreas contíguas queimadas, esperam-se resultados mais confiáveis. Por outro lado, se o padrão de ocorrência tiver muitas áreas pequenas e fragmentadas, então as incertezas serão maiores.

O processo de validação realizado neste estudo fornece informações necessárias para o aprimoramento do algoritmo automático de detecção de queimadas, AQM. Atualmente, está em andamento processos de validação cobrindo todo o bioma Cerrado.

Agradecimentos

À Funcate e à Fapesp (Projeto BrFLAS Brazilian Fire-Land-Atmosphere System 2015/01389-4 e 2016/10137-1) pelo apoio financeiro.

Referências

Bastarrika, A.; Chuvieco, E.; Nartín, M. P. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1003-1012, 2011.

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.; Flasse, S. P.; Brivio, P. A. Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 280-292, 2004.

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.

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.

Grégoire, 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.

(INPE) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2016. Programa Queimadas – Monitoramento por Satélites. Disponível em: https://queimadas.dgi.inpe.br/aq1km/. Acesso em: 13 nov.2016.

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.

Libonati, R.; DaCamara, C. C.; Setzer, A. W.; Morelli, F.; Melchiori, A. E. An Algorithm for Burned Area Detection in the Brazilian Cerrado Using 4 μm MODIS Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, p. 15782-15803, 2015a.

Libonati, R.; DaCamara, C. C.; Setzer, A. W.; Morelli, F.; Melchiori, A. E.; Cândido, P. A.; Jesús, S. C. Validating MODIS burned area products over Cerrado region. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17., 2015b, João Pessoa. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, São José dos Campos: INPE, 2015b.

Melchiori, A.E. Algoritmo digital automático para estimar áreas queimadas em imagens de média resolução da região do Jalapão. Relatório de Atividades GIZ. Janeiro 2014.

(MMA) Ministério do Meio Ambiente. 2016. **O Bioma Cerrado**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado. Acesso em: 13 nov2016.

Mouillot, F.; Schultz, M.G.; Yue, C., Cadule P.; Tansey, K.; Ciais, P.; et al. 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**, v. 26, p. 64-79, 2014.

Palacios-Orueta, A.; Chuvieco, E.; Parra, A.; Carmona-Moreno, C. Biomass burning emissions: a review of models using remote-sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 104, p. 189-209, 2005.

Pereira, J. M. C. Burned area mapping in Central Africa using ATSR data. **International Journal of Wildland Fire**, v. 12, p. 259-270, 2003.

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, 2015.

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.

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.

Tansey, K.; Grégoire, 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.

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