

COMO AFETA A INDISPONIBILIDADE DE UMA IMAGEM DE PÓS-FOGO IMEDIATO NO MONITORAMENTO DOS EFEITOS DAS QUEIMAS NAS SAVANAS AMAZÔNICAS?

Daniel Borini Alves ^{1,2}, Fernando Pérez-Cabello ², Thiago Sanna Freire Silva ¹

¹ Universidade Estadual Paulista/Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Av. 24-A, 1515, Rio Claro, Brasil; ² Universidad de Zaragoza/Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Calle Pedro Cerbuna, 12, Zaragoza, Espanha.

daniel.borini@unesp.br, fcabello@unizar.es, thiago.sf.silva@unesp.br

RESUMO

O presente estudo analisa os efeitos imediatos do fogo sobre ambientes de savana amazônica mediante índices espectrais derivados de sensoriamento remoto, comparando os valores de uma imagem de pós-fogo imediato com uma imagem pós-fogo mais distante da data de ocorrência. Com este fim, foram gerados e analisados cinco índices (NDVI, NDMI, SAVI, NBR e dNBR) para uma série de três imagens Landsat (pré-fogo, pós-fogo imediato e pós-fogo), em um incêndio ocorrido em áreas do maior enclave de savana tropical da Amazônia Meridional. O uso de uma imagem pós-fogo mais distante da data do incêndio resultou na infra-estimação significativa das repercussões imediatas da queima observadas no pós-fogo imediato, com um acordo global de 10,2% no mapeamento de suas categorias de severidade. Ratifica-se a importância de se considerar a dimensão temporal na análise de incêndios nas savanas tropicais.

Palavras-chave — áreas queimadas, efeitos do fogo, savana amazônica, respostas da vegetação, Landsat.

ABSTRACT

This study aims to analyze the immediate effects of fire incidence over Amazonian savanna environments through spectral indices derived from remote sensing, comparing the values of an immediate post-fire image with a post-fire image farther from the date of occurrence. For this purpose, five indices (NDVI, NDMI, SAVI, NBR and dNBR) were generated and analyzed for three Landsat images (pre-fire, immediate post-fire and post-fire) in a wildfire over the largest tropical savanna enclave of Southern Amazon. The use of a post-fire image farther from the fire-date resulted in a significant underestimation of the burning effects observed in the immediate post-fire image, with an overall accuracy of 10.2% in the mapping of fire severity. The results highlight the relevance of carefully considering the temporal dimension in the analysis of wildfires over tropical savannas.

Key words — burned areas, fire-effects, Amazonian savanna, vegetation responses, Landsat.

1. INTRODUÇÃO

Em âmbitos globais, o fogo é um dos principais agentes que influenciam na dinâmica dos processos ecológicos [1]. Nos ambientes de savana tropical, este elemento desempenha um importante papel para a ciclagem de nutrientes e para a manutenção da diversidade e da estrutura dos habitats [2,3], mas

o aumento das pressões antrópicas observado nas últimas décadas tem alterado significativamente os seus regimes naturais, impactando no funcionamento destes ecossistemas [4].

No contexto de monitorar e melhor entender aspectos relacionados a incidência do fogo sobre estas áreas, são essenciais as análises derivadas de sensoriamento remoto [5], e principalmente aquelas que geram informações de média/alta resolução espacial, mais adequadas ao âmbito da gestão em escala local/regional [6]. Imagens da série Landsat demonstraram ser uma importante fonte de informação para delimitar áreas queimadas [7], avaliar seus impactos [8] ou avaliar a dinâmica pós-fogo [9]. Esta série dispõe de bandas nas regiões do visível, infra-vermelho próximo (NIR) e infra-vermelho de ondas curtas (SWIR), aplicadas na geração índices espectrais habitualmente utilizados para o monitoramento e análise da vegetação afetada pelo fogo [5,10,11].

Nas savanas tropicais, obter uma informação de pós-fogo imediato (~30 dias após a queima) é considerado um fator chave, já que o processo de regeneração vegetal é rápido e dinâmico [12]. A falta desta informação dificulta a interpretação dos reais impactos do fogo mediante índices espectrais, já que o uso de imagens mais distantes da ocorrência apresentam estimacões obscurecidas pelas rápidas respostas da vegetação ao fogo [13]. Ainda que a série Landsat dispõe de ao menos uma imagem a cada 16 dias, essa continuidade é muitas vezes afetada pela alta influência de perturbações atmosféricas, como se verifica em muitas áreas de transição do Cerrado e da Amazônia brasileira [14,15], dificultando em vezes que se conte com um registro de pós-fogo imediato dos incêndios.

Neste contexto, o presente trabalho busca quantificar e caracterizar os impactos imediatos do fogo sobre áreas de savana tropical mediante índices espectrais derivados de imagens Landsat, e mais especificamente sobre ambientes de savana amazônica. Computam-se e comparam-se os valores de índices espectrais obtidos com uma imagem de pós-fogo imediato com outra mais distante no tempo, contabilizando as estimativas de infra-valoracão dos efeitos do fogo às que se incorre ao não dispor de registros de pós-fogo imediato.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Como área de estudo (Figura 1), se selecionou um fragmento do Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA) [16], com um total de 11.860 hectares afetados por um incêndio entre os dias 7 de agosto e 1º de setembro de 2015.

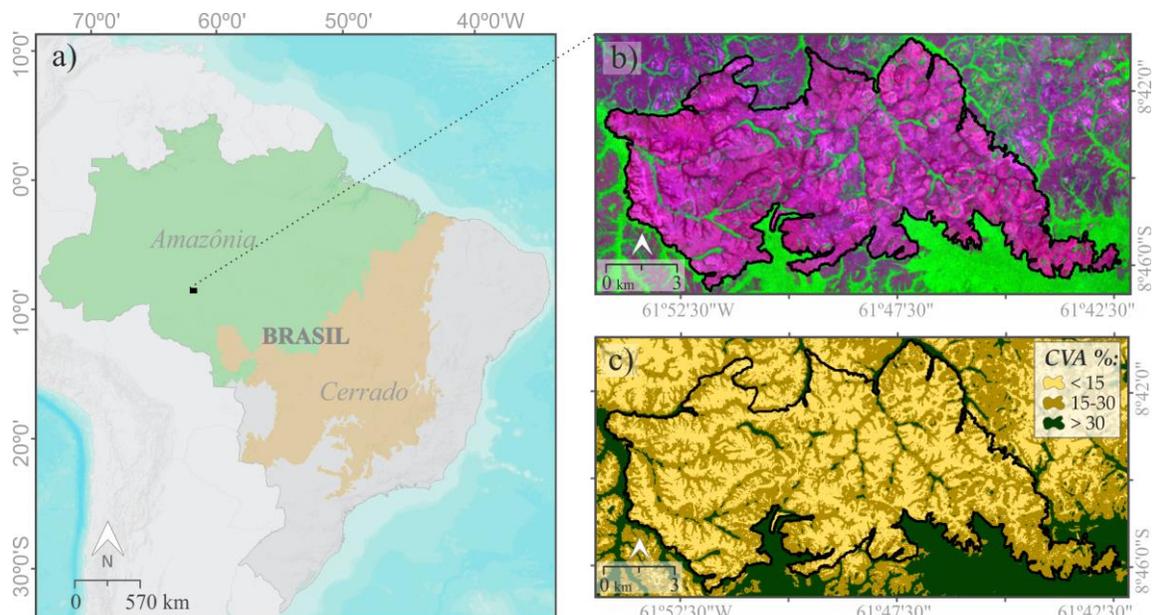


Figura 1. Área de estudo: a) área selecionada em meio a zonas de predomínio do bioma amazônico; b) áreas afetadas pelo fogo (Landsat ETM+ de 19/09/2015, SWIR₂-NIR-Red/R-G-B), delimitadas pelo seu perímetro (polígono preto); c) porcentagem de Cobertura Vegetal Arbórea (CVA) por pixel [17], em condições pré-fogo do ano de 2015.

O ECCA é uma área de predomínio de fisionomias de savana tropical em meio a uma grande área de predomínio de vegetação amazônica. O grupo de formações vegetais é genericamente classificado como savana amazônica disjunta [18]. A área apresenta variações de fitofisionomias que vão desde formações campestres (campo limpo e campo sujo) variando para formações savânicas (campo cerrado e cerrado *stricto sensu*) e florestais, sendo estas últimas muito vinculadas a vegetação ciliar e a fragmentos menores de vegetação arbórea [19].

2.2. Materiais e procedimentos metodológicos

Foram obtidas três imagens da série Landsat associadas ao incêndio estudado (*path/row-231/66*), que representam as condições: pré-fogo (02/08/2015) – 5 dias antes do início do incêndio; pós-fogo imediato (03/09/2015) – 2 dias posterior ao fim do incêndio; e pós-fogo (21/10/2015) – 50 dias depois do incêndio.

Todas as imagens utilizadas pertencem a nova coleção de produtos Landsat disponível (*Landsat Collection 1 Surface Reflectance Level-2 Science Products*), que permite dispor de informações adequadas para a análise multitemporal (processadas com correções radiométricas, geométricas e atmosféricas). Esta coleção está disponível gratuitamente sob demanda pelo *Center Science Processing Architecture (ESPA)* do *United States Geological Survey* (<<https://espa.cr.usgs.gov/>>). As três imagens utilizadas derivam do sensor ETM+ (SLC-off), motivo pelo qual se aplicou um filtro espacial que considera os valores dos 3x3 pixels vizinhos para o preenchimento de seus *gaps*. Cabe comentar que o recorte espacial está situado em áreas centrais da cena, sendo afetado minimamente pelo bandado de SLC-off (apenas 0,67% de sua área). Uma máscara de nuvens foi

ainda aplicada na imagem de pós-fogo imediato (1,54% de sua área), associando a valores “*nodata*”.

Prosseguindo, foram gerados os índices espectrais dispostos na Tabela 1. Para a sua análise, os valores de pixels internos ao perímetro de incêndio foram agrupados de acordo com a sua classe de predominância de CVA: <15%; 15-30%; >30%, dispostos na Figura 1c. Se selecionou uma amostra aleatória de 10% dos pixels afetados pelo fogo ($n = 13.040$) da área, dos quais se derivaram atributos estatísticos de cada índice e categoria de CVA. Com base nestes atributos, são comparados os impactos da queima observados nas imagens de pós-fogo imediato e de pós-fogo. Adicionalmente, a contabilização do índice dNBR [20] foi utilizada para a discretização cartográfica de cinco níveis de severidade do fogo: alta - A (0,660-1,300), moderada-alta - MA (0,440-0,659), moderada-baixa - MB (0,270-0,439), baixa - B (0,149-0,269) e não queimado - NQ (<0,149). Os mapas de níveis de severidade derivados da imagem de pós-fogo imediato e da imagem de pós-fogo foram comparados visual e estatisticamente (matriz de confusão).

Tabela 1. Índices espectrais utilizados neste estudo.

Índice espectral	Fórmula
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	$NDMI = \frac{NIR - SWIR_1}{NIR + SWIR_1}$
Normalized Burn Ratio (NBR)	$NBR = \frac{NIR - SWIR_2}{NIR + SWIR_2}$
Differenced Normalized Burn Ratio (dNBR)	$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Monitoramento mediante índices espectrais

A observação da variação dos valores médios (Tabela 2) entre as imagens de pré-fogo (PRE), pós-fogo imediato (POST_{im}) e pós-fogo (POST) retratam os efeitos da incidência do fogo observados mediante índices espectrais nestes ambientes.

Nas três classes de CVA, os índices apresentam um descenso abrupto dos seus valores médios entre as observações de pré-fogo e pós-fogo imediato, sensíveis as alterações de vigor vegetal associadas a passagem do fogo. Tomando como referência a variação dos valores NDVI com classe de CVA intermediária, os valores médios passam de 0,625 para 0,312 entre os registros pré e pós-fogo imediato. No seguinte registro (POST), retrata-se um valor médio de 0,516, superior em 0,204 em relação ao observado nas condições de pós-fogo imediato, vinculado à rápida resposta da vegetação a ação do fogo observada nas savanas tropicais.

Estas diferenças entre o registro de POST_{im} e POST permitem dimensionar os impactos do uso de uma imagem mais distante no tempo para a caracterização os efeitos imediatos do fogo nas áreas estudadas. Em todos os índices analisados, se verifica um aumento significativo dos seus valores médios no registro de pós-fogo em relação ao seu registro prévio; isso supõe uma minimização do pico de descenso dos valores médios observados no pós-fogo imediato (POST_{dif} superiores a 20% em todos os índices analisados).

Tabela 2. Valores médios de cada índice espectral.

Índice	CVA (%)	PRE 02/08/15	POST _{im} 03/09/15	POST 21/10/15	POST _{dif} * (%)
NDVI	<15	0,46	0,23	0,38	32,88
	15-30	0,63	0,31	0,52	34,82
	>30	0,81	0,56	0,67	55,91
NDMI	<15	-0,17	-0,24	-0,20	41,94
	15-30	0,04	-0,16	-0,01	26,37
	>30	0,33	0,13	0,18	75,00
SAVI	<15	0,22	0,11	0,20	24,07
	15-30	0,34	0,15	0,27	38,42
	>30	0,49	0,31	0,38	59,88
NBR	<15	0,09	-0,17	0,04	20,85
	15-30	0,37	-0,04	0,21	38,77
	>30	0,67	0,41	0,49	69,23

* POST_{dif} = [(PRE - POST) / (PRE - POST_{im})] * 100

3.2. Categorização de níveis de severidade do fogo

O mapeamento de níveis de severidade do fogo apresentam resultados muito distintos quando derivados de uma imagem de pós-fogo imediato (Figura 2_a) ou pós-fogo (Figura 2_b).

A distribuição das classes de severidade obtidas com a imagem de pós-fogo imediato permite descrever o comportamento habitual das queimais nas savanas tropicais, onde os níveis baixo e moderado-baixo predominam nas áreas de formações vegetais mais abertas, enquanto que as áreas com maior densidade de vegetação lenhosa são em geral mais afetadas com severidades moderada-alta e alta.

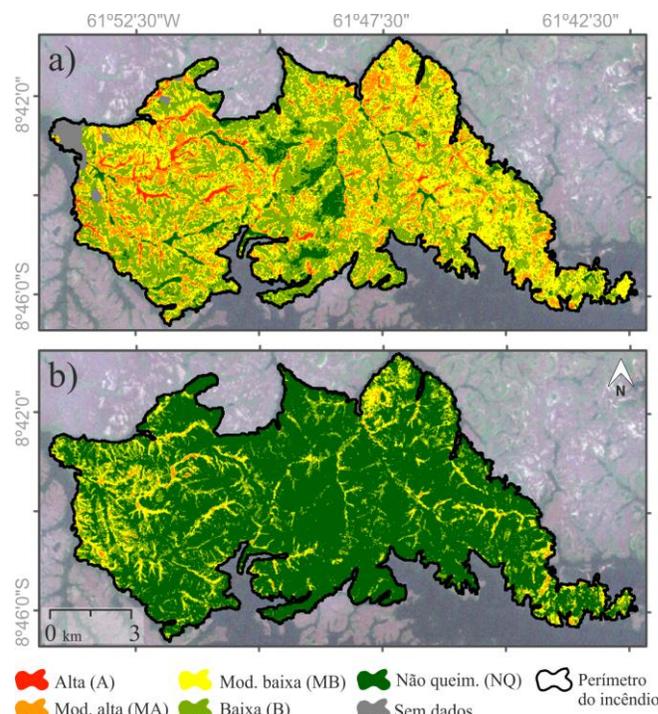


Figura 2. Cartografia de níveis de severidade (dNBR) com base na imagem de pós-fogo imediato (a) e pós-fogo (b). Ao fundo de ambas as imagens se dispõe de uma Landsat ETM+ em transparência (composição em cor verdadeira).

Já a cartografia obtida com a imagem mais distante da ocorrência do incêndio apresenta um padrão bastante alterado em relação a anterior. Nas áreas abertas predominam as categorias “não queimado” ou de baixa severidade, enquanto que as áreas com maior densidade de espécies lenhosas apresentam severidades moderada-baixa ou moderada-alta em áreas muito reduzidas em relação ao mapa anterior.

A quantificação destas diferenças pode ser observada com maior detalhe no cômputo da matriz de confusão entre as duas cartografias (Tabela 3). A concordância global entre os dois mapeamentos apresenta uma percentual muito baixo, de 10,2%, destacando-se a infravaloração dos níveis de severidade derivada do uso de uma imagem mais distante da ocorrência do incêndio. Ratifica-se assim a importância de se considerar a dimensão temporal para a correta utilização deste índice na análise de incêndios nas savanas tropicais [13].

Tabela 3. Matriz de confusão entre os mapas de severidade derivados da imagem de pós-fogo imediato (a) e pós-fogo (b).

b \ a	Níveis de severidade (subtotais)					Total (km ²)	P* (%)
	NQ	B	MB	MA	A		
NQ	6,77	44,25	28,94	4,27	0,01	84,25	8,04
B	0,06	2,72	10,18	8,89	0,24	22,09	12,32
MB	0,01	0,21	1,84	6,14	1,61	9,80	18,77
MA	0,00	0,01	0,09	0,64	0,46	1,19	53,66
A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	73,68
Total (km²)	6,83	47,19	41,05	19,95	2,33	117,35	-
P* (%)	99,07	5,77	4,48	3,21	0,54	-	1021

* P = precisão/acordo entre categorias de severidade.

4. CONCLUSÕES

Os resultados observados permitem caracterizar os efeitos imediatos do fogo em ambientes de savana tropical mediante o uso de índices espectrais, evidenciando a importância de se dispor de uma imagem de pós-fogo imediato para o correto dimensionamento dos seus impactos sobre estes ambientes.

Demonstra-se que a utilização de uma imagem pós-fogo de maior distância temporal desde a ocorrência do incêndio pode supor uma infra-estimação significativa das repercussões imediatas do fogo sobre essas superfícies, tanto no monitoramento de índices espectrais, como na cartografia de níveis de severidade. Futuros estudos serão realizados para compreender os efeitos imediatos e prolongados do fogo nas áreas estudadas, combinando o uso de dados derivados de sensoriamento remoto e o monitoramento de variáveis *in situ*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo financiamento da pesquisa por parte do CNPq (PDJ 154660/2018-3) e da CAPES (processo n. 9540-13-0).

REFERÊNCIAS

- [1] Pausas, J.G. e Keeley, J.E., “A burning story: The role of fire in the history of life”, *Bioscience*, v. 59, n. 7, pp. 593–601, 2009.
- [2] Fidelis, A. e Pivello, V.R., “Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos?”, *Biodiversidade Brasileira*, v. 1, n. 2, pp. 12–25, 2011.
- [3] Coutinho, L.M., Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: Goldammer, J.G., “Fire in the Tropical Biota”, Springer, Berlin, pp. 82–105, 1990.
- [4] Goldammer, J.G., Historical biogeography of fire: tropical and subtropical. In: Crutzen, P.J. e Goldammer, J.G., “The ecological, atmospheric and climatic importance of vegetation fires”, John Wiley & Sons, New York, pp. 297–314, 1993.
- [5] Pereira, J.M.C., “Remote sensing of burned areas in tropical savannas”, *International Journal of Wildland Fire*, v. 12, n. 4, pp. 259–270, 2003.
- [6] Lentile, L.B.; Holden, Z.A.; Smith, A.M.S.; Falkowski, M.J.; Hudak, A.T.; Morgan, P.; Lewis, S.A.; Gessler, P.E. e Benson, N.C., “Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects”, *International Journal of Wildland Fire*, v. 15, n. 3, pp. 319–345, 2006.
- [7] Bastarrika, A.; Alvarado, M.; Artano, K.; Martinez, M.P.; Mesanza, A.; Torre, L.; Ramo, R. e Chuvieco, E., “BAMS: a tool for supervised burned area mapping using Landsat data”, *Remote Sensing*, n. 6, pp. 12360–12380, 2014.
- [8] Escuin, S.; Navarro, R. e Fernández, P., “Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 4, pp. 1053–1073, 2008.
- [9] Bartels, S.F.; Chen, H.Y.H.; Wulder, M.A. e White, J.C., “Trends in post-disturbance recovery rates of Canada’s forests following wildfire and harvest”, *Forest Ecology and Management*, n. 361, pp. 194–207, 2016.
- [10] Chuvieco, E.; Martín, M. P. e 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, n. 23, pp. 5103–5110, 2002.
- [11] Trigg, S. e Flasse, S., “Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 21, n. 16, pp. 3161–3168, 2000.
- [12] Bowman, D.M.J.S.; Zhang, Y.; Walsh, A. e Williams, R.J., “Experimental comparison of four remote sensing techniques to map tropical savanna fire-scars using Landsat-TM imagery”, *International Journal of Wildland Fire*, v. 12, n. 4, 2003.
- [13] Veraverbeke, S.; Lhermitte, S.; Verstraeten, W.W. e Goossens, R., “The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: the case of the large 2007 Peloponnese wild fires in Greece”, *Remote Sensing of Environment*, n. 114, pp. 2548–2563, 2010.
- [14] Asner, G.P., “Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 18, pp. 3855–3862, 2001.
- [15] Sano, E.E.; Ferreira, L.G.; Asner, G.P. e Steinke, E.T., “Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna”, *International Journal of Remote Sensing*, v. 28, n. 12, pp. 2739–2752, 2007.
- [16] Alves, D.B. e Pérez-Cabello, F., “Multiple remote sensing data sources to assess spatio-temporal patterns of fire incidence over Campos Amazônicos Savanna Vegetation Enclave (Brazilian Amazon)”, *Science of Total Environment*, n. 601–602, pp. 142–158, 2017.
- [17] Sexton, J.O.; Song, X.P.; Feng, M.; Noojipady, P.; Anand, A.; Huang, C.; Kim, D.H.; Collins, K.M.; Channan, S.; Dimiceli, C. e Townshend, J.R., “Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with lidar-based estimates of error”, *International Journal of Digital Earth*, v. 6, n. 5, pp. 427–448, 2013.
- [18] Ratter, J.A.; Bridgewater, S. e Ribeiro, J.F., “Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation: comparison of the woody vegetation of 376 areas”, *Edinburgh Journal of Botany*, n. 60, pp. 57–109, 2003.
- [19] Oliveira-Filho, A.T. e Ratter, J.A., Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado Biome, In: Oliveira, P.S. e Marquis, R.J., “The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna”, Columbia University Press, New York, EUA, pp. 91–120, 2002.
- [20] Key, C.H. e Benson, N.C., Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods, In: Lutes, D.C.; Keane, R.E.; Caratti, J.F.; Key, C.H.; Benson, N.C.; Sutherland, S. e Gangi, L.J., “FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system”, U.S. Department of Agriculture/Forest Service, Fort Collins, CO, USA, pp. 1–55, 2006.