

Avaliação de nove índices espectrais quanto a separabilidade entre queimadas e diferentes alvos

Allan Arantes Pereira^{1,2}
Luis Marcelo Tavares de Carvalho²
Renata Libonati^{3,4}
Fausto Weimar Acerbi Júnior²
Fabiano Morelli³

¹Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais –
IFSULDEMINAS/Campus Poços de Caldas
Caixa Postal 37701-103 – Poços de Caldas - MG, Brasil
allan.pereira@ifsuldeminas.edu.br

²Universidade Federal de Lavras – UFLA
Caixa Postal 37200-000– Lavras - MG, Brasil
passarinho@dcf.ufla.br ; fausto@dcf.ufla.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
renata.libonati@cptec.br ; fabiano.morelli@cptec.br

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências.
Caixa-postal: 32819 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro, RJ - Brasil -

Abstract. The aim of this study was evaluate which spectral indices have higher separability in the discrimination of burned areas of other targets in the Landsat 5 TM images on Cerrado areas in northern Minas Gerais. For this, nine spectral indices were calculated; Burned Area Index (BAI), Char Soil Index (CSI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Burn Ratio (NBR), variation of Normalized Burn Ratio (nbr2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Mid-Infrared Burn index (MIRBI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and checked your the separability by the index M. To assist the analysis, we calculated the basic statistics and the spectral signatures generated before and after the wildfire, and also the graph in space bi-spectral regions in red (band 3), near infrared (band 4), and shortwave infrared (bands 5 and 7). The results showed the MIRBI and NBR2 indices with better separability. Already NBR, NDVI, SAVI and CSI indices presented intermediate values of separability compared to other indices tested in this work. While the spectral indices BAI, EVI and NDMI had weak separability. We conclude that the indices using the bands of the shortwave infrared region showed the best results and are the most suitable for mapping fires in the region, Landsat 5 TM images.

Palavras-chave: remote sensing, separability indices, burned area, sensoriamento remoto, índices de separabilidade, área queimada.

1. Introdução

O mapeamento das áreas queimadas é fundamental para o registro desse sinistro e conseqüentemente, o aprimoramento das atividades preventivas, aumentando a eficiência técnica e econômica dos trabalhos de controle deste sinistro (FONSECA; RIBEIRO, 2003). Além disso, outras áreas do conhecimento como saúde, ecologia e estudos sobre emissões de gases de efeito estufa, têm interesses na quantificação das áreas queimadas (DENNEKAMP; ABRAMSON, 2011; XAUD et al., 2013; SOMMERS et al., 2014).

Neste sentido, o sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizado no mapeamento das queimadas, uma vez que possibilita coletar de forma remota, informações sobre queimadas de grandes extensões e em áreas de difícil acesso, que dificilmente seriam

registradas (SMITH et al., 2007; PAVON et al., 2011; CHUVIECO et al., 2012; MALLINIS; KOUTSIAS, 2012; MATTAR et al., 2012; MORENO RUIZ et al., 2012; PAVON; CHUVIECO, 2013).

Apesar de vários trabalhos encontrados na literatura, segundo Stroppiana et al.(2012) ainda existem várias limitações a serem resolvidas. A diversidade das tipologias florestais é um deles, uma vez que as fitofisionomias presentes na área possuem peculiaridades estruturais que interferem diretamente nas suas características espectrais e conseqüentemente nos algoritmos de mapeamento de queimada.

Com o intuito de minimizar esse problema, a maioria dos trabalhos que tem por finalidade de mapear as queimadas por meio de sensoriamento remoto, utilizam índices espectrais para melhor caracterizar e então discriminar as queimadas de outros alvos (PAVON et al, 2011; CHUVIECO et al, 2012; LIBONATI et al., 2012; MALLINIS & KOUTSIAS. 2012; MATTAR et al, 2012; STROPPIANA et al., 2012; PAVON & CHUVIECO, 2013;).

Esses índices espectrais têm o intuito de discriminar a informação de interesse com outros alvos de semelhança espectral, além de normalizar ou minimizar os efeitos ligados a coleta de dados espaciais (LIU, 2007, JENSEN, 2009, PONZONI et al., 2012). Apesar disso, por serem provenientes de expressões matemáticas envolvendo valores de reflectância, esses índices são sensíveis a mudanças das características espectrais nas diferentes fitofisionomias.

Dessa forma, esse trabalho é norteado pela seguinte questão: Qual(is) índice(s) possui(em) uma maior capacidade diferenciar queimadas de outros alvos, em áreas de Cerrado? Assim, o objetivo desse trabalho é investigar os índices espectrais quanto a capacidade de diferenciar as queimadas dos demais alvos nas imagens TM, a fim de verificar qual o mais indicado no mapeamento de queimadas em área de cerrado do norte de Minas Gerais.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) está localizada na bacia do Rio São Francisco na região norte do estado de Minas Gerais em área de transição entre os domínios dos biomas Cerrado e Caatinga, com predomínio do Cerrado, com as fitofisionomias de Cerrado sensu stricto, Campo Cerrado, Campo, Vereda, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual (CARVALHO; SCOLFARO, 2008).

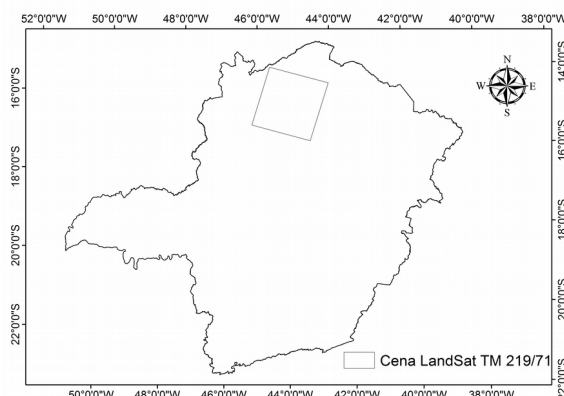


Figura 1 - Área de estudo localizada na região norte do estado de Minas Gerais.

A região possui um clima do tipo semi-árido (CARVALHO et al., 2008) com uma temperatura média de 23°C e uma precipitação anual média de 1.000 mm/ano, sendo as chuvas concentradas nos meses de novembro a janeiro (NUNES et al., 2006).

2.2 Imagens TM

Para o cálculo dos índices espectrais utilizou-se imagens, sensor TM do satélite Landsat 5, adquiridas na base de dados da série histórica LandSat Surface Reflectance Climate Data Record (United State Geological Survey – USGS), já com correções geométricas a atmosféricas e dados de reflectância. A cena é referente ao ponto/órbita – 219/71, nas datas 05/09/2007 (T1) e 07/10/2007 (T2). A escolha do período se deu em função da grande incidência de focos no mês de setembro de 2007.

2.3 Assinatura espectral e Espaço Bi-espectral.

A título de comparação, foram analisadas as assinaturas espectrais das amostras coletadas nas imagens T2, a fim de comparar os dados antes e depois das queimadas. A assinatura espectral auxilia na compreensão das propriedades espectrais da vegetação presente na área e suas modificações depois de um distúrbio.

Também foram plotados em um espaço bi-temporal os valores das amostras de queimadas em T1 e T2. Para essa análise, utilizou as combinações de bandas que mais distinguiram entre os valores de T1 e T2.

2.4 Índices Espectrais

Para a análise da separabilidade, foram calculados os índices espectrais; Burned Area Index (BAI), Char Soil Index (CSI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Burn Ratio (NBR), variation of Normalized Burn Ratio (NBR₂), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized difference Moisture Index (NDMI), Mid-Infrared Burn Index (MIRBI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).

Esses índices são amplamente utilizados nos trabalhos de mapeamento de queimadas (PAVON et al, 2011; CHUVIECO et al, 2012; MALLINIS & KOUTSIAS, 2012; MATTAR et al, 2012; STROPPIANA et al., 2012; PAVON & CHUVIECO, 2013). A tabela 1 apresenta os índices, a equação e a referência dos índices, onde B se refere a banda 1 do Landsat 5 TM (azul, 0,45 - 0,52 µm), R se refere a banda 3 (vermelho, 0,60 – 0,69), NIR a banda 4 (infravermelho próximo, 0,76 - 0,90 µm), SWIR1 a banda 5 (infravermelho de onda curta, 1,55 – 1,75 µm) e SWIR a banda 7 (infravermelho de onda curta, 2,08 - 2,35 µm).

Tabela 1. Equações para o cálculo dos índices espectrais BAI, CSI, EVI, NBR, NBR₂, NDVI, NDMI, MIRBI, SAVI.

Índice	Equação	Referência
BAI	$1/(((0.1-R)^2) + ((0.6-NIR)^2))$	Martín et al,1998, Chuvieco et al. (2002)
NBR	$(NIR-SWIR2) / (NIR+SWIR2)$	Key & Benson (1999)
MIRBI	$(10*SWIR2) - (9.8*SWIR1) + 2$	Trigg & Flasse, 2001
NDVI	$(NIR-R) / (NIR+R)$	Rouse (1973)
SAVI	$(NIR-R)*(1+L)/(NIR+R+L)$ with L = 1	Huete (1988)
CSI	$NIR / SWIR2$	Smith et al. (2007)
NBR ₂	$(SWIR2 - SWIR1) / (SWIR2 + SWIR1)$	Martín et al. (2005)
NDMI	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$	Jensen, 2009
EVI	$(NIR - R) / (NIR + 6 * R - 7.5 * B + 1)$	Jensen, 2009

2.5 Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com base nas amostras (104.086 pixels) coletadas em áreas queimadas na imagem pós fogo (T2). Foram calculados a média, mínimo, máximo, variância, desvio padrão e o coeficiente de variação dos pixels de queimadas nas imagens diferença (T1 – T2) de cada índice espectral.

2.6 Índices de separabilidade

Para a análise da separabilidade calculou-se o índice M, frequentemente utilizados em trabalhos de processamento digital de imagens. Os índices de separabilidade têm grande potencial no sensoriamento remoto, sendo útil na análise da discriminação de classes de interesse (SWAIN; KING, 1973; KAUFMAN E REMER (1994); TRUC et al, 2011; BASTARRIKA et al., 2011; SCHEPERS et al., 2014).

O teste M foi definido por KAUFMAN E REMER (1994) como a diferença da média em T1 e T2 dividido pela soma do desvio padrão em T1 e T2:

$$M = \frac{|\mu_{nq} - \mu_q|}{\sigma_{nq} + \sigma_q} \quad (1)$$

onde μ_{nq} (σ_{nq}) e μ_q (σ_q) são, respectivamente, a média (desvio padrão) dos valores do conjunto de pixels não queimados (T1) e queimados (T2). Esse teste representa a sobreposição dos histogramas das classes analisadas, sendo baixa separabilidade entre as classes quando $M < 1$ e alta separabilidade quando $M > 1$ (PEREIRA 1999, VERAVERBEKE et al., 2011, SCHEPERS et al., 2014).

3. Resultados e Discussão

3.1 Assinatura e espaço Bi-Espectral

A assinatura espectral das amostras coletadas é procedente dos valores médios de reflectância multiplicada por 100, dos pixels antes (T1) e depois (T2) das queimadas em cada banda. A Figura 2 mostra uma maior distinção de T1 e T2, quanto aos valores nas bandas 4, 5 e 7 em contraste com as bandas na faixa do visível (bandas 1, 2 e 3).

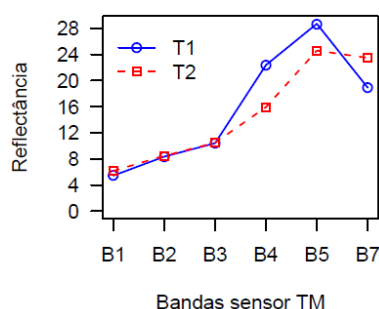


Figura 2: Assinatura espectral antes T1 (azul) e depois T2 (vermelho) das queimadas.

O gráfico da assinatura espectral apresentou uma queda nas médias dos valores de reflectância nas regiões do infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho de onda curta na faixa de 1,55-1,75 micrometros (banda 5), enquanto a reflectância na no infravermelho de onda curta na faixa de 2,08-2,35 micrometros (banda 7) teve um aumento.

O gráfico bi-espectral dos valores das amostras, representaram uma melhor separabilidade no espaço das bandas da região do espectro infravermelho de médio de onda curta; bandas 5 e 7 (Figura 3).

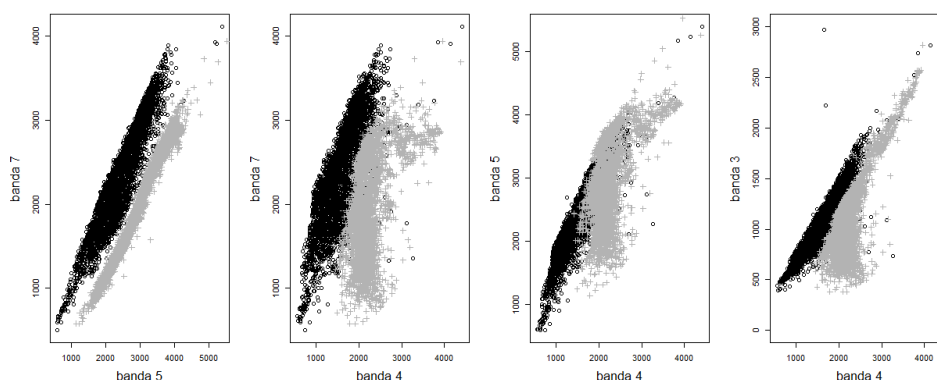


Figura 3: Gráfico de dispersão no espaço bi-espectral.

Os pontos em preto representam os valores de reflectância multiplicados por 10.000 antes das queimadas (T1). Já os pontos cinzas representam a reflectância (multiplicada por 10.000) depois das queimadas (T2). Observa-se que a representação do espaço bi-temporal na razão das bandas 5 e 7, apresentam uma boa separabilidade entre os dados.

Por outro lado, as razões entre os valores de reflectância na faixa de infravermelho próximo (banda 4) com as regiões do vermelho (banda 3) e infravermelho de ondas curtas (banda 5 e 7), não apresentaram boa separabilidade.

3.2 Análise dos índices

As análises estatísticas mostraram que os índices MIRBI e NBR₂ possuem um menor coeficiente de variação. Em contraste, os demais índices apresentaram maiores valores de coeficiente de variação (acima de 45%). A tabela 2 apresenta os resultados das análises estatísticas.

Tabela 2. Valores de mínimo (Min), máximo (Max), média (Mean), variância (Var.), desvio padrão (Stdev) e coeficiente de variação (CV%) para os valores das diferenças dos índices espectrais em T1 e T2.

ÍNDICES	Min	Max	Mean	Var.	Stdev	CV
MIRBI	0.2435	1.5716	0.8585	0.0540	0.2325	27.1
NDVI	0.0006	0.9666	0.1714	0.0071	0.0841	49.1
NBR	0.0003	0.8476	0.2882	0.0200	0.1415	49.1
BAI	0.0005	3.4855	0.8777	0.5098	0.7140	81.4
CSI	0.0008	2.9380	0.5819	0.1376	0.3709	63.7
SAVI	0.0001	0.7015	0.0955	0.0019	0.0431	45.1
NBR ₂	0.0304	0.4418	0.1914	0.0036	0.0597	31.2
NDMI	0.0000	0.4940	0.1067	0.0073	0.0853	79.9
EVI	0.0006	2.1869	0.1222	0.0076	0.0869	71.2

3.3 Análise do índice de separabilidade

Os resultados das estatísticas descritas acima influenciam diretamente no cálculo no índice M uma vez que é calculado com base na média e desvio padrão. Dessa forma, o resultado obtido no coeficiente de variação (CV) segue a mesma ordem para o índice M (Tabela 4).

Tabela 4: Índices espectrais e respectivos valores do índice de separabilidade M

Índices Espectrais	Índice M
MIRBI	2.76
NDVI	1.10
NBR	1.27
BAI	0.69
CSI	1.09
SAVI	1.46
NBR2	2.02
NDMI	0.65
EVI	0.65

De acordo com a tabela 4:

1 – Os índices espectrais que utilizam apenas as combinações das bandas do infravermelho de ondas curtas (MIRBI, NBR₂) apresentam maior separabilidade ($M > 2$).

2 – Os índices NBR, NDVI, SAVI e CSI apresentam valores intermediários de separabilidade quando comparado aos outros índices ($1 < M < 2$).

3 – Os índices espectrais BAI, NDMI e EVI apresentam separabilidade fraca, não permitindo a separação de pixels queimados e não queimados ($M < 1$).

O índice MIRBI foi desenvolvido por Trigg & Flasse (2001) que avaliou o espaço espectral das queimadas e a separabilidade de não queimadas em uma região da savannah africana. Nesse mesmo trabalho, os autores apresentaram melhores resultados da discriminação de queimadas no espaço bi-espectral na faixa do infravermelho de ondas curtas (bandas 5 e 7).

Assim como esse estudo, Smith et al. (2007) não encontram bons resultados utilizando o índice BAI na discriminação de queimadas em Savanas africanas. No estudo de Smith et al. (2007) e no presente estudo, o baixo desempenho do índice BAI pode ser explicado pelas diferenças características entre a vegetação do Cerrado, e das Savanas africanas, e a vegetação dos países situados na região mediterrânea da Europa, onde o estudo de Chuvieco et al. (2002) foi desenvolvido.

Pereira et al., 1999 apontaram que existem divergências na literatura sobre as propriedades espectrais de áreas queimadas. Segundo os autores, a maioria dos trabalhos indicam que o período de tempo entre a ocorrência de incêndios e aquisição das imagens, podem interferir nas propriedades espectrais. Os autores consideram ainda as diferenças específicas dos biomas também interferem na relação da dinâmica espectral pós incêndio.

4. Conclusões

A partir dos resultados, pode-se observar uma maior separabilidade nos índices espectrais que utilizam as bandas do infravermelho de onda curta (banda 5 e banda 7) em seus cálculos.

Os índices MIRBI e NBR₂ apresentaram melhor capacidade de diferenciar queimadas de diferentes alvos. Assim, os resultados apontam esses índices como os mais indicados para o mapeamento de queimadas norte de Minas Gerais, em imagens LandSat 5 TM.

Sugerem-se trabalhos futuros da aplicação dessa metodologia em diferentes biomas do estado de Minas Gerais e em diferentes intervalos de tempo entre a aquisição das imagens, para comparação com os resultados desse trabalho.

5. Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS) pelo apoio logístico que possibilitou a execução desse trabalho e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da Bolsa do Programa de Formação Doutoral Docente do IFSULDEMINAS.

6. Referências Bibliográficas

Carvalho, L. G.; de Oliveira, M. S.; Alves, M. C.; Vianello, R. L.; Sedyama, G. C.; Neto, P. C.; Dantas, A. A. A. Clima. **In.** Scolforo, J. R. S.; Carvalho, L. M. T.; Oliveira, A. D. **Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais. Componente Geofísico e Biótico.** Lavras-MG,: Editora UFLA, 2008. cap. 4, p. 89-101.

Carvalho, L. M. T.; Scolforo, J. R. S. **Inventário Florestal de Minas Gerais: Monitoramento da flora nativa 2005 – 2007.** Lavras-MG,: Editora UFLA, 2008. 357 p.

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, n. 23, p 5103–5110, 2002.

Chuvieco, E.; Sandow, C.; Guenther, K. P.; González-Alonso, F.; Pereira, J.M.; Pérez, O.; Bradley A.V.; Schultz, M.; Mouillot F.; Ciaís, P. GLOBAL BURNED AREA MAPPING FROM EUROPEAN SATELLITES: THE ESA FIRE_CCI PROJECT. **In:** XXII ISPRS Congress, 2012, Australia. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2012. Articles, Volume XXXIX-B8, p. 13-16. Disponível em <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B8/13/2012/isprsarchives-XXXIX-B8-13-2012.pdf>>. Acesso em 06 jul. 2014.

Dennekamp, M.; Abramson, M. J. The effects of bushfire smoke on respiratory health. **Respirology**, Hoboken, v. 16, n. 2, p. 198-209, 2011.

Fonseca, E. M. B.; Ribeiro, G. A. **Manual de prevenção de incêndios florestais.** Belo Horizonte: CEMIG, 2003. 112 p.

Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**. v. 25, n. 3, p 295-309, 1988.

Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

Key, C. H., & Benson, N. C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. U.S. Department of the Interior, Northern Rocky Mountain Science Centre. 1999.

Libonati R.; DaCamara C. C.; Pereira J. M. C.; Peres L. F. Retrieving Middle-Infrared Reflectance Using Physical and Empirical Approaches: Implications for Burned Area Monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 1, p. 281-294, 2012

Liu, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto.** Campo Grande: UNIDERP, 2007. 908 p.

Martín, M.P. **Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR.** 1998. Ph.D. dissertation Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid. 1998

Martín, M. P.; Gómez, I.; Chuvieco, E. Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. **In** J. Riva, F. Pérez-Cabello, & E. Chuvieco (Eds.), **Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment** p. 193–198. Paris: Universidad de Zaragoza, GOF-C-GOLD, EARSeL. 2005.

Mattar C.; Santamaria-Artigas A.; Durán-Alarcón, C. Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. **Revista de Teledetección**. v. 38, n. 1, p. 36-50,2012.

Moreno-Ruiz, J. A.; Riano, D; Arbelo, M; French, N. H. F; Ustin, S. L; Whiting, M. L. Burned area mapping time series in Canada (1984–1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p.407-414, 2012.

Nunes, Y. R. F. et al. **Fenologia e germinação de sementes de dez espécies arbóreas da Reserva da Copasa**. Relatório Técnico Final. Juramento, Minas Gerais. Universidade Estadual de Montes Claros, 2006. 110 p.

Pavón, O, Martín P.; Chuvieco, E. : Burned area mapping with MERIS postfire image, **International Journal of Remote Sensing**, v. 32. n.15, 4175-4201. 2011.

Pavón, O.; Chuvieco, E. : Assessment of the discrimination ability of MERIS spectral data for burned area mapping using ROC curves, **GeoFocus (Artículos)**, v. 2. n. 13, p. 41-65. ISSN: 1578-5157. 2013

Pereira, J. M. C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.37, n. 1. p. 217–226. 1999.

Ponzoni, F. J. ; Shimabukuro, Y E.; Kuplich, T. M. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2012. 160 p.

Rouse, J.W.; Haas, H. R.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the great plains with ERTS. **In.: Nasa Erts Symposium**. V. 3 1973 p. 309 – 17.

Schepers, L.; Haest, B.; Veraverbeke, S.; Spanhove, T.; Vanden B.; Jeroen; Goossens, R. Burned Area Detection and Burn Severity Assessment of a Heathland Fire in Belgium Using Airborne Imaging Spectroscopy (APEX). **Remote Sensing**, vol. 6, n. 3, p. 1803-1826. 2014.

Smith A.M.S., Drake, N.A., Wooster, M.J., Hudak A.T., Holden, Z.A. E Gibbons C.J. Production of Landsat ETM+ Reference Imagery of Burned Areas within Southern African Savannas: Comparison of Methods and Application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12. p. 2753-2775. 2007.

Sommers, W. T.; Loehman, R. A.; Hardy, C. C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Science overview and knowledge needs. **Forest Ecology and Management**. v. 317. n. 1. p. 1–8. 2014.

Stroppiana D.; Bordogna; G.; Carrara, P; Boschetti, M.; Boschetti, L.; Brivio; P.A. A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 69. n. 1. p. 88–102, 2012.

Trigg, S., & Flasse, S. An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 13. p. 2641–2647, 2001.

Veraverbeke, S.; Harris, S.; Hook, S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. **Remote Sensing of Environment**. v. 115, n. 10. p. 2702–2709, 2011

Xaud, H. A. M.; Martins, F. S. R. V.; Santos, J. R. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 294, p. 97-106, 2013.