

Desempenho de índices espectrais na identificação de áreas queimadas e validação de detecções do Portal de Monitoramento de Queimadas

João Flávio Costa dos Santos¹
Sidney Geraldo Velloso²
Guilherme Silverio Aquino de Souza¹
José Marinaldo Glerianni¹
Cibele Hummel do Amaral¹

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV
36570-000 - Viçosa - MG, Brasil
{joao.flavio, guilherme.silverio, gleriani, chamaral}@ufv.br

²Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
80010-300 - Florianópolis - SC, Brasil
sidney.velloso@ibge.gov.br

Abstract. Besides the detection of fire focus, the orbital remote sensing allows the use of a series of spectral indexes for the identification of burn scars. The objectives of this work were to evaluate the performance of indexes in the determination of the burned area and to validate the detections of the Burn Monitoring Portal. There were calculated nine indexes with spectral information of the sensors Thematic Mapper and Enhanced Thematic Mapper Plus (30m) of the Landsat series. There were raised heat focus between June of 1988 and December of 2015 of all the available orbital sensors in the Burn Monitoring Portal. The indexes Normalized Burn Ratio and Char Soil Index had the best performance in the identification of the burned areas. These indexes differ from others because they consider spectral information of the near and medium infrared regions. The more critical period was from September to November. Of the total of burns identified by data from the series Landsat, 37% also were detected by the Burn Monitoring Portal. This low percentage of success is due to the low spatial resolution of the sensors used by this portal. Many fire focus weren't detected because they were in the opposite face of the sensor's passing, or due to the cloud cover, or yet by the occurrence of fire between the period of the sensor's passing. Besides this limitation, these data are very useful to determine the time of fire focus concentration.

Palavras-chave: remote sensing, fire monitoring; fire index, sensoriamento remoto, monitoramento de incêndios, índices de fogo.

-1. Introdução

As queimadas e os incêndios florestais na Mata Atlântica vão de encontro aos pressupostos da conservação estabelecidos pelo Pacto de Restauração da Mata Atlântica (Rodrigues, 2009). Embora seja crime ambiental, os dados disponibilizados pelo Portal de Monitoramento de Queimadas (PMQ) (INPE, 2016) demonstram que os focos de calor ainda são recorrentes nesse bioma.

O monitoramento de queimadas e incêndios florestais é uma das diversas aplicações do Sensoriamento Remoto orbital na área ambiental. É possível, por exemplo, a detecção tanto dos focos ativos (por meio das bandas térmicas, principalmente nos comprimentos de onda entre 3,7 e 4,1 μ m) quanto dos efeitos da passagem do fogo na paisagem (com bandas do visível e infravermelho próximo e médio) (Lentile et al., 2006).

Para o Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) fornece desde 1988, dados diários de detecções de focos de calor. O INPE processa imagens de sensores orbitais que possuem bandas na faixa do infravermelho médio (~3-6 μ m), como o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), o *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Esses sensores têm um período de revisita curto, o que favorece o monitoramento dos incêndios, por outro lado, a resolução espacial (~1km) dificulta a detecção e a localização acurada dos focos.

Neste sentido, trabalhos de validação das detecções realizados com sensores de baixa resolução espacial são necessários. Uma das possibilidades é comparar as detecções com informações de áreas queimadas extraídas de sensores de melhor resolução espacial, por exemplo, aqueles da série Landsat (30m) (Pereira et al., 2012). Os índices espectrais auxiliam nessa detecção de áreas queimadas. Na literatura, encontram-se diversos deles utilizados com esse propósito (Harris et al., 2011; Schepers et al., 2014; Liu et al., 2016).

Os objetivos deste trabalho foram quantificar a área queimada a partir de índices espectrais e validar as detecções do Portal de Monitoramento de Queimadas.

2. Metodologia de trabalho

A área de estudo está localizada entre os municípios de Rio das Flores e Valença no Estado do Rio de Janeiro e Santa Bárbara do Monte Verde, Belmiro Braga e Rio Preto em Minas Gerais (Figura 1) (88.172 ha). A região está integralmente inserida no domínio do bioma Mata Atlântica, predominando a fitofisionomia Floresta Estacional Semidecidual. O clima é o subtropical úmido com inverno seco e verão quente e úmido (Cwa) pela classificação de Köppen. A topografia é tipicamente de mares de morros.

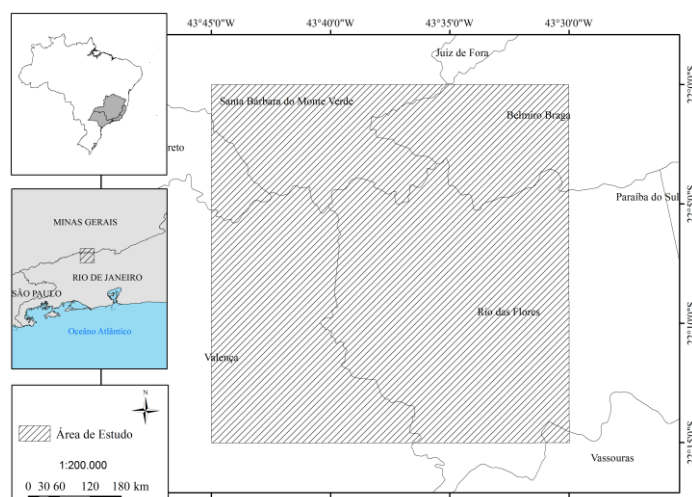


Figura 1. Localização da Área de Estudo.

Para caracterizar o histórico de queimadas na região, foram levantadas as detecções do Portal de Monitoramento de Queimadas (PMQ) entre 01/06/1988 e 31/12/2015 (INPE, 2016). Os dados foram adquiridos em formato vetorial, com datum Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS 2000. Neste trabalho, foram utilizados dados de todos os sensores disponíveis no PMQ (AVHRR; MODIS; GOES I-M; SEVIRI; VIIRS; ASTR) com processamento posterior para eliminar redundância de informações.

Esse processamento é necessário, pois a relação foco de calor e queimadas/incêndios não é direta. Muitas detecções são repetições, isto é, o mesmo incêndio foi detectado por diferentes sensores. Cada registro indica a detecção de foco de calor dentro de um pixel. Neste sentido, ainda que haja mais de uma frente de fogo, um único foco será indicado dentro do pixel. Se a frente de fogo é muito pequena, pode não caracterizar a emissividade de calor característica de uma queimada e o foco não será indicado. Se uma queimada for muito extensa, ela será detectada em alguns pixels vizinhos, ou seja, vários focos estarão associados a uma única grande queimada. Uma única frente de fogo que perdure alguns dias também terá detecções sucessivas nas passagens periódicas do sensor.

Para realizar uma validação das detecções do PMQ, buscou-se, no período avaliado, o ano com maior disponibilidade de imagens da série Landsat com baixa cobertura de nuvens. O

ano de 2002, escolhido para essa análise, apresentou a vantagem da operação conjunta dos sensores *Thematic Mapper* (TM)/Landsat 5 e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)/Landsat 7, o que aumentou a disponibilidade de imagens.

Para identificar as áreas queimadas, os valores de números digitais foram transformados para reflectância planetária no topo da atmosfera (TOA) conforme o procedimento descrito por Chander et al., (2009) e diferentes índices espectrais (Tabela 1) foram calculados.

Tabela 1. Índices espectrais utilizados para identificar áreas queimadas.

Índice	Fórmula	Referência
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Rouse et al. (1974)
<i>Enhanced Vegetation Index</i>	$EVI = G \frac{NIR - Red}{NIR + Red \cdot C_1 - Blue \cdot C_2 + L}$	Huete et al. (1997)
<i>Global Environmental Monitoring Index</i>	$GEMI = \gamma(1 - 0,25\gamma) \frac{(Red - 0,125)}{(1 - Red)}$ $\gamma = \frac{2(NIR^2 - Red^2) + 1,5NIR + 0,5Red}{NIR + Red + 0,5}$	Pinty e Verstraete (1992)
<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$SAVI = (1 + L) \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)}$	Huete (1998)
<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$MSAVI = \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - Red)}}{2}$	Qi et al. (1994)
<i>Burned Area Index</i>	$BAI = \frac{1}{(0,1 - Red)^2 + (0,06 - NIR)^2}$	Martín e Chuvieco (1998)
<i>Normalized Burn Ratio</i>	$NBR = \frac{NIR - ISWIR}{NIR + ISWIR}$	Key e Benson (1999)
<i>Char Soil Index</i>	$CSI = \frac{NIR}{ISWIR}$	Shimited et al. (2007)

NIR – infravermelho próximo; Red – vermelho; ISWIR – infravermelho médio; L = 0,5.

Para avaliar a eficácia dos índices espectrais e eleger o mais adequado para a detecção de áreas queimadas, foi utilizado o índice de separabilidade M (Kaufman e Remer, 1994) (Equação 1). Para essa análise foram distribuídos, aleatoriamente, 750 pontos para cada uma das seguintes classes de cobertura da terra: Área queimada; Água; Solo exposto; Vegetação. Quanto mais elevado for o valor do discriminante M, melhor a capacidade do índice em distinguir área queimada de outras classes.

$$M = \left| \frac{\mu_b - \mu_u}{\sigma_b + \sigma_u} \right| \quad (1)$$

em que:

- μ_b - valor médio da resposta espectral da área queimada;
- σ_b - desvio padrão da resposta espectral da área queimada;
- μ_u - valor médio da resposta espectral da área não queimada;
- σ_u - desvio padrão da resposta espectral da área não queimada;

Por fim, para validar as detecções do PMQ adotou-se o seguinte procedimento: primeiramente aplicou-se um *buffer* correspondente ao valor da diagonal do pixel ($L \cdot \sqrt{2}$) do

respectivo sensor à cada detecção, deixando, dessa forma, o pixel circunscrito no *buffer*. Foi considerado acerto se a cicatriz de queimada, identificada com o índice espectral, estava contida (parcialmente ou integralmente) no *buffer*. Nessa análise utilizou-se a cena Landsat (TM ou ETM+) com data mais próxima à detecção do foco. Desta forma, também pode ser analisado o erro de omissão (não detecção).

3. Resultados e Discussão

No período de 01/06/1998 a 31/12/2015 o Portal de Monitoramento de Queimadas (PMQ) detectou 831 focos de calor na área estudada. Após eliminar a redundância de informações, constatou-se que esses registros correspondem a 481 queimadas/incêndios. O ano de maior ocorrência foi 2014 (138) enquanto em 2008 somente uma ocorrência foi observada. Analisando a distribuição mensal, há uma tendência em concentração dos focos nos meses de agosto (15,38%) setembro (29,73%) e outubro (42,83%), período que coincide com a estação seca.

A estatística M (Equação 1) mostrou que o índice espectral *Normalized Burn Ratio* (NBR) seguido pelo *Char Soil Index* (CSI) foram os mais indicados para a distinção de áreas queimadas (Figura 2). Em geral, os índices espectrais foram eficientes em separar a vegetação da área queimada; a diferenciação com solo só não foi boa no *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI); todos os índices de vegetação e o *Burned Area Index* (BAI) separaram pouco as áreas queimadas da classe água. O índice de pior desempenho foi o EVI.

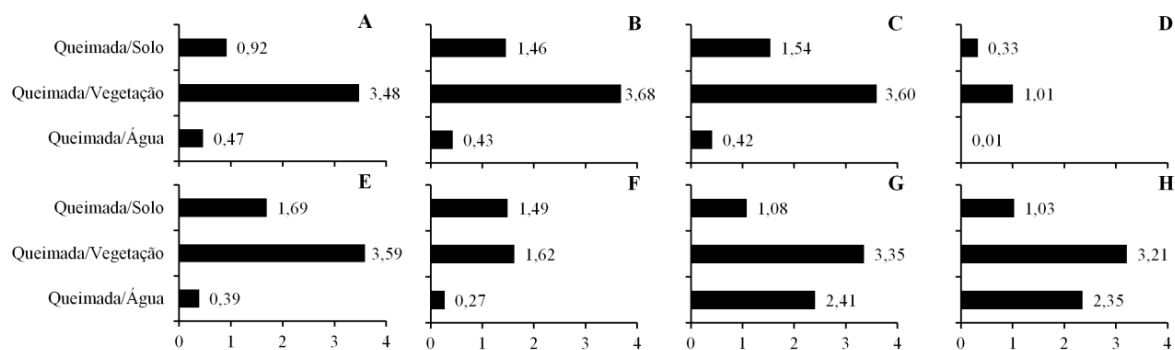


Figura 2. Separabilidade M entre área queimada e classes de cobertura da terra para ETM+/Landsat 7 (16-11-2002). A – NDVI; B – SAVI; C - MSAVI; D – EVI; E – GEMI; F-BAI; G- NBR; H – CSI.

Em função da passagem do fogo, a resposta característica de alvos terrestres é alterada e, essa alteração possibilita o uso dos índices espectrais para a detecção de áreas queimadas. O NDVI (Rouse et al, 1974), um dos índices mais utilizados nessa análise, utiliza as informações espectrais da região do vermelho e infravermelho próximo. O fogo expõe o solo, diminui o teor de umidade e degrada a clorofila, havendo um aumento de reflectância na região do vermelho. Já no infravermelho próximo, em função da degradação da estrutura foliar, ocorre uma redução significativa da reflectância em áreas queimadas, anteriormente cobertas por vegetação sadia (Lentile et al., 2006; Escuin et al., 2008). O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) adiciona um fator de correção do solo (L) na fórmula do NDVI com o propósito de eliminar o efeito de fundo. Como a escolha do fator L tende a ser subjetiva, Qi et al. (1994) propuseram uma modificação nesse índice originando o *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (MSAVI), que seleciona automaticamente a constante de calibração em

função da densidade da vegetação. Neste estudo, pode-se observar que esses índices introduziram melhorias na distinção entre solo e áreas queimadas (Figura 2).

Os outros índices analisados, que consideram essas regiões espectrais, foram desenvolvidos para minimizar a influência de efeitos atmosféricos. Esse é o caso do índice não linear *Global Environmental Monitoring Index* (GEMI) (Pinty e Verstraete, 1992), o que facilitaria o reconhecimento de superfícies escuras, como o caso das áreas queimadas (Pereira, 1999). Outro índice importante nessa consideração é o EVI (Huete et al. 1997): uma vez que as bandas de comprimentos de ondas menores são mais influenciadas pelos efeitos atmosféricos, esse índice utiliza a banda azul para calibrar a banda vermelha. Apesar dessas características, esses dois índices tiveram desempenho inferior ao NDVI na distinção de áreas queimadas.

Os índices BAI, NBR e CSI foram especificamente desenvolvidos para a detecção de área queimadas. O BAI (Martín e Chuvieco, 1998) teve o objetivo de otimizar a detecção de áreas queimadas pelo sensor AVHRR/NOAA. A criação desse índice foi fundamentada no pressuposto de que a radiância de uma classe de cobertura tende a convergir para um valor central característico no espaço espectral. Assim, os autores propuseram o cômputo do somatório da distância euclidiana nas regiões espectrais do vermelho e infravermelho próximo, e para que as áreas queimadas apresentassem os maiores valores desse índice, propuseram a inversão dos valores. Para os dados desse sensor os autores encontraram que o valor central característico das áreas queimadas é próximo a 0,1 para a banda vermelha e 0,06 para infravermelho próximo. Embora tenha sido calibrado para o sensor AVHRR/NOAA, esses valores de referência tem sido utilizados para outros sensores APEX (Schepers et al., 2014) Thematic Mapper (TM)/Landsat e AVHRR/NOAA (Chuvieco, 2002); MODIS/ASTER (Harris et al, 2011); CCD/HJ satélites (Liu et al., 2016). Uma desvantagem desse índice é que a faixa de variação do mesmo pode ser muito alta. Em estudos futuros sugere-se que valores centrais característicos para os sensores *Thematic Mapper* (TM)/Landsat 5 e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)/Landsat 7 sejam investigados.

Um dos primeiros trabalhos a utilizar o sensor TM/Landsat-5 na detecção de incêndios foi realizado por García e Caselles (1991). Os autores observaram que a diferença normalizada em refletância entre o infravermelho próximo (TM4, 0,76-0,90 μm) infravermelho médio (TM7, 2,08-2,35 μm) foi o parâmetro mais indicado para detecção de áreas queimadas. O NBR, como viria ser designado por Key e Benson (1999), foi um dos primeiros índices a incluir o uso da região do infravermelho médio na detecção de áreas queimadas. Essa região espectral é fortemente absorvida pelo conteúdo de água na vegetação ou solo. Assim, com a passagem do fogo e diminuição do conteúdo de água, essa refletância aumenta (Chuvieco, 1997) implicando em baixos valores de NBR. O índice CSI (Shimied et al 2007) também se utiliza desse comportamento espectral após a passagem do fogo. Em função dessas características os índices NBR e CSI, que consideraram as bandas ETM+4 (0,77-0,90 μm , infravermelho) e ETM+7 (2,09-2,35 μm , infravermelho médio) tiveram maior sucesso na separação das áreas queimadas das demais classes (Figura 2).

Em função do melhor desempenho do NBR, esse índice espectral foi escolhido para calcular a área queimada (no ano de 2002). O procedimento para determinação da área queimada consistiu em analisar o histograma da imagem para cada data e aplicar um limiar de separação das áreas queimadas para as áreas não queimadas (Figura 3).

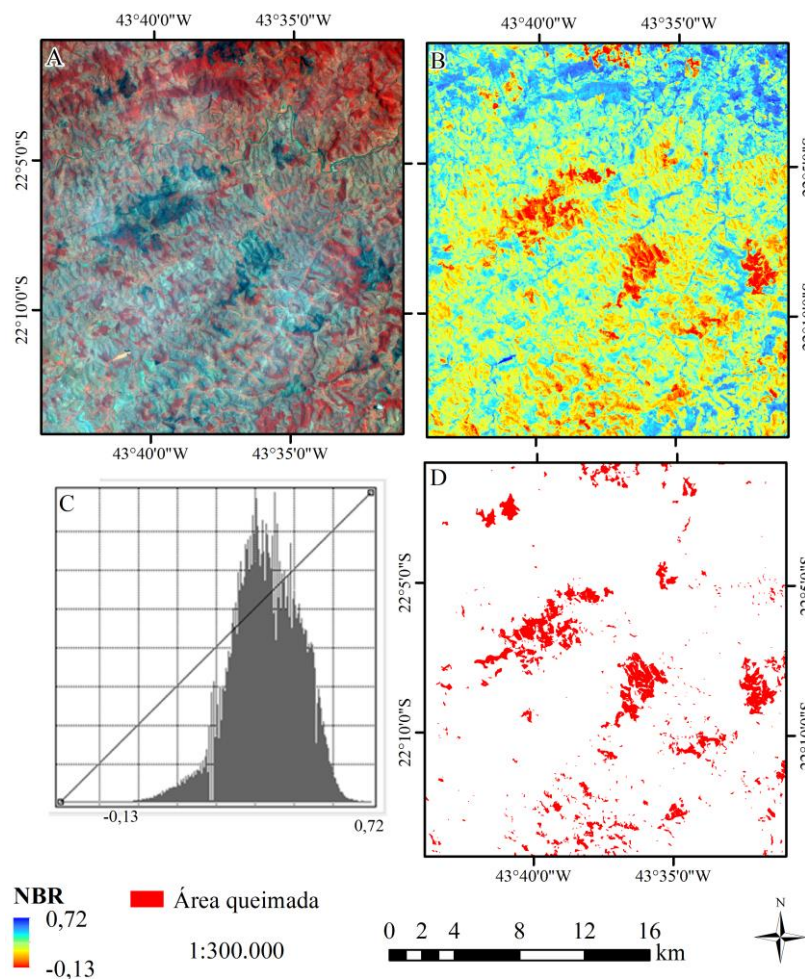


Figura 3. Exemplo do processo de extração da área queimada: a partir das informações espectrais de reflectância planetária TOA (A) (composição 4, 2, 1) calcula-se o índice *Normalized Burn Ratio* (NBR) (B) e após análise do histograma e aplicação de limiar (C), determina-se a área queimada (D).

Utilizando o índice NBR, foram identificados 256 polígonos de área queimada, distribuídos entre os meses de maio e dezembro do ano de 2002 (Figura 4). Chegou-se ao quantitativo de 5.154 ha queimados (5,84% da área de estudo) no ano de 2002. Os períodos mais críticos foram de setembro a outubro e de outubro a novembro, resultado que equivale àquele encontrado para o período 1998 a 2015 com dados do PMQ (Figura 4).

Os polígonos de área queimada estão entre 0,2 e 745 ha, com predomínio de áreas menores. Este fato pode ser interpretado como o uso frequente do fogo para manejo de pastagens em pequenas propriedades rurais, no entanto, ao fugir do controle o fogo se propaga sobre outras áreas podendo gerar grandes incêndios florestais.

Nesse mesmo ano (2002) o INPE (2016) contabilizou 110 detecções (10 no mês de agosto, 2 em setembro, 95 em outubro, 3 em novembro) que após a eliminação da redundância corresponderam a 43 focos de queimadas/incêndios florestais. Confrontando esses resultados com os dados extraídos da interpretação de cenas Landsat verificou-se que 37% das ocorrências de queimadas e incêndios foram detectadas pelos sensores do portal de monitoramento de queimadas (PMQ).

Como esclarece o INPE (2016) as não detecções (erro de omissão) podem ocorrer quando: as frentes de fogo têm menos de 30 m; o fogo ocorre apenas no chão de uma floresta densa, sem afetar a copa das árvores; há nuvens cobrindo a região;

a queimada tem pequena duração, ocorrendo entre as imagens disponíveis ou quando o Fogo ocorreu em uma encosta de montanha, enquanto que o satélite só observou o outro lado. Dentre estas possibilidades, a cobertura por nuvens e o efeito do relevo são as mais prováveis para a região. A área de estudo está em uma área de relevo caracterizado pelos mares de morros e as áreas em chamas podem ficar escondidas pelos morros. A baixa porcentagem de detecções do PMQ também foi observada por Pereira et al., (2012) segundo os quais apenas 26% das ocorrências de queimadas/incêndios foram detectadas no norte de Minas Gerais.

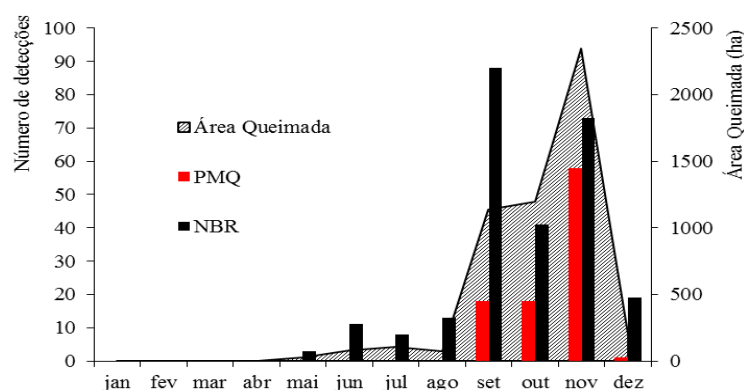


Figura 4. Detecções de queimadas e incêndios florestais pelo Portal de Monitoramento de Queimadas (PMQ) e com o índice *Normalized Burn Ratio* (NBR), e área queimada no ano de 2002.

Do total de detecções do PMQ (43) apenas três foram fora da faixa de aceitação (buffer) estabelecida. O que indica uma boa acurácia das localizações dos focos de calor. Conforme o portal de monitoramento de queimadas e incêndios, a imprecisão na localização do foco de queima pode variar de 1 km a 6 km, em função da resolução espacial do detector. Em um trabalho de validação da detecção de queimadas e incêndios com dados AVHRR/NOAA os resultados indicaram que o erro médio está em torno de 400 m, com desvio padrão de ~3 km e cerca de 80% dos focos estão em um raio de 01 km das coordenadas indicadas (INPE, 2016).

4. Conclusões

Os focos de calor concentram-se nos meses de setembro, outubro e novembro. O índice de melhor desempenho foi o *Normalized Burn Ratio* seguido pelo *Char Soil Index*. No geral, todos os índices distinguiram bem a áreas queimadas da vegetação, mas confundiram principalmente com água e solo exposto. A maioria das detecções do Portal de Monitoramento de Queimadas tiveram um erro de deslocamento inferior ao tamanho do pixel do detector. No entanto, apenas 37% das queimadas foram identificadas pelo portal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES).

Referências Bibliográficas

Chander, G.; Markham, B. L.; Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p.893–903, 2009.

Chuvieco, E. (Ed), 1997, Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin (Berlin: Springer-Verlag).

Chuvieco, E.; Martin, 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.

Escuin, S.; Navarro, R.; Fernandez, 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, p. 1053-1073, 2008.

Harris, S.; Veraverbeke, S.; Hook, S. Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. **Remote Sensing**, v. 3, n.11, p. 2403-2419, 2011.

Huete, A. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p.295-309, 1998.

Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Leeuwen, W. Van. A comparison of vegetation index over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.59, p.440-451, 1997.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: 21out. 2016.

Kaufman, Y. J.; Remer, L. A. Detection of forests using mid-IR reflectance: an application for aerosol studies. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 3, p. 672-683, 1994.

Key, C. H.; Benson, N. C. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. US Dept. Interior, Northern Rocky Mountain Sci. Center, Bozeman, MT. 1999.

Lentile, L. B.; Holden, Z. A.; Smith, A. M.; Falkowski, M. J.; Hudak, A. T.; Morgan, P.; Benson, N. C. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. **International Journal of Wildland Fire**, v. 15, n. 3, p. 319-345, 2006.

Liu, W.; Wang, L.; Zhou, Y.; Wang, S.; Zhu, J.; Wang, F. A comparison of forest fire burned area indices based on HJ satellite data. **Nature Hazards**, v.81 p.971-980, 2016.

Martín I, M. D. P.; Chuvieco S. E. Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. **Serie Geográfica**, v.7, p109-128, 1998.

Pereira, A. A.; Pereira, J. A. A.; Morelli, F.; Barros, D. A.; Acerbi Junior, F. W.; Scolforo, J. R. S. Validação de focos de calor utilizados no monitoramento orbital de queimadas por meio de imagens TM. **Cerne**, v. 18, n.2, p. 335-343, 2012.

Pinty, B.; Verstraete, M. M. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. **Vegetatio**, v.101, n.1, p.15-20, 1992

Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A. R.; Kerr, Y. H.; Sorooshian, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.48, n.2, p.119-126, 1994.

Rodrigues, R. R. **Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. LERF; Piracicaba: ESALQ, 2009, 256p.

Rouse Jr. J.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA special publication**, v. 351, p. 309, 1974.

Schepers, L.; Haest, B.; Veraverbeke, S.; Spanhove, T.; Vanden Borre, J.; Goossens, R. Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). **Remote Sensing**, v.6, n.3, p. 1803-1826, 2014.

Smith, A.; Drake, N.; Wooster, M.; Hudak, A.; Holden, Z.; Gibbons, C. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: Comparison of methods and application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v., 28, p. 2753-2775, 2007.