

## Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas

Daniela de Azeredo França  
Nelson Jesus Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{franca, nelson}@itid.inpe.br

**Abstract.** Radiances measured by environmental satellites are an important source of data to monitor land use in the Earth's surface. In this sense remote sensing techniques have been very important to detect and assess forest fires mainly in tropical countries. Currently there are several satellites being used for this type of application. The objective of this review is to highlight the advantages and limitations of the main sensors systems used in the last years to monitor forest fires.

**Palavras-chave:** forest fires, detection, monitoring, queimadas, detecção, monitoramento.

### 1. Introdução

Nas últimas décadas, houve uma crescente preocupação com a preservação das florestas tropicais. Isto resultou da conscientização cada vez maior da sociedade sobre a importância da cobertura vegetal para a manutenção da vida no planeta, principalmente devido ao papel que ela desempenha na absorção de gás carbônico da atmosfera e liberação de oxigênio através do processo de fotossíntese, o qual é essencial para garantir a qualidade do ar que respiramos.

A sobrevivência e equilíbrio de florestas de grande porte, como a Floresta Amazônica, são essenciais para o funcionamento de vários ciclos da troposfera. Pesquisas realizadas acerca deste tema têm demonstrado que além de impactos em pequena e meso escalas, a destruição destas florestas pode causar variações ambientais em escala global, correspondendo a um dos fatores que contribuem para a ocorrência de mudanças nos climas local, regional e mundial. Deste modo, o desflorestamento provocado pelas queimadas e suas implicações climáticas, nos ciclos biogeoquímicos e na biodiversidade têm se tornado cada vez mais questões centrais em diversas áreas do conhecimento.

O fenômeno das queimadas é controlado principalmente pelos seguintes fatores: clima, condições da vegetação e atividade humana, os quais estão intimamente ligados (Justice et al., 1993). A queima de biomassa em países tropicais tem sido, provavelmente desde o último Holoceno, uma prática comum, pelo menos numa escala local (Phulpin et al., 2002). Essa prática intensificou-se nas últimas décadas, o que tem causado grandes prejuízos, como danos à saúde humana e perdas quanto à flora e à fauna.

Em função dos impactos mencionados, há uma necessidade de melhorar o entendimento e monitoramento deste fenômeno. Assim, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental, na medida em que os bancos de dados gerados através do uso de satélites correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre. Atualmente, há uma grande variedade de satélites na órbita da Terra, que carregam diversos tipos de sensores com diferentes resoluções espaciais e temporais, e de técnicas para detectar os impactos causados por incêndios em países tropicais.

Com o intuito de contribuir para a compreensão do sistema de queimadas no Brasil, o objetivo deste trabalho é fornecer um panorama dos diferentes sistemas sensores que têm sido utilizados na detecção, monitoramento e estudo de incêndios florestais em diversas partes do planeta. Uma abordagem quanto à resolução espacial e espectral destes sensores será feita a fim de colaborar para a escolha mais adequada do(s) satélite(s) na detecção e no monitoramento de queimadas.

## **2. Potencialidades do sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa para ajudar a entender a dinâmica do desflorestamento e do uso da terra, assim como seus impactos ecológicos e sociais, pois esta tecnologia permite obter dados de áreas muito extensas em intervalos de tempo regulares. Desta forma, pode-se disponibilizar informações espaciais e temporais sobre as ocorrências de queimadas, além de quantificações da área e da biomassa afetadas pelo fogo, fornecendo uma importante contribuição para o estudo de incêndios no meio ambiente e seus efeitos ecológicos, climáticos e na química da atmosfera.

Phulpin et al. (2002), mostraram que as imagens de satélite têm sido utilizadas para monitorar incêndios em vegetação tanto globalmente, para estudos climáticos, quanto regionalmente, para avaliação de impactos das queimadas. Ao mesmo tempo, os dados provenientes de satélites têm se mostrado de fundamental importância para alertar a população local e as autoridades competentes, durante os períodos de queimadas.

Além disso, as informações geradas por sensoriamento remoto sobre a distribuição, o padrão e o ritmo da queima de biomassa em diferentes escalas podem ainda oferecer novas oportunidades para observar as relações entre as condições da vegetação e as queimadas (Justice et al., 1993).

Diante destas características, somadas ao seu custo relativamente baixo, quando comparado a métodos convencionais (como o levantamento de campo, por exemplo), e ao fato de que nos países tropicais os incêndios florestais são muito comuns durante a estação seca (de junho a setembro) – o que favorece o monitoramento das queimadas por satélite, devido a pouca presença de nuvens – pode-se atestar a importância da utilização desta técnica em nosso país.

## **3. Algumas considerações sobre as características espectrais das queimadas e propriedades dos sensores**

Pereira (1987) mostrou que existem três fontes de radiação envolvidas na detecção de incêndios: a emissão pelo incêndio em si, ou seja, pelas substâncias em combustão; a emissão e reflexão da área em que ocorre o incêndio, incluindo-se os resíduos de combustão; e a emissão e reflexão provenientes de outras fontes, como o solo exposto, interferindo neste processo. Dessa forma, sensores remotos que operam na região óptica do espectro eletromagnético possuem grande utilidade na detecção e avaliação das queimadas.

Na região visível do espectro eletromagnético (de 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ), a ocorrência de queimada pode ocasionar uma elevação da reflectância em áreas de floresta, devido à exposição do solo, o qual reflete mais do que a vegetação verde. Por outro lado, em áreas de savanas – que possuem estrato herbáceo geralmente seco, apresentando alta reflectância no visível – as queimadas tendem a escurecer as áreas atingidas. Porém, a utilização desta faixa espectral não é recomendada para a identificação de queimadas, devido à possibilidade de se confundir outros alvos, como corpos d'água, sombras de nuvens e determinados tipos de solo, com as marcas deixadas pela queimada (França, 2004).

A faixa espectral do infravermelho próximo (de 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ) é a mais indicada para a identificação e mapeamento de cicatrizes feitas pelas queimadas, pois neste intervalo a vegetação possui alta reflectância, devido à predominância do espalhamento interno da radiação na folha, a qual é reduzida pela ocorrência de incêndios, havendo elevado contraste entre a vegetação queimada e a não queimada. Um exemplo de sensor que opera nesta faixa é o AVHRR, a bordo do satélite NOAA, por meio da banda 2 (0,725 a 1,10  $\mu\text{m}$ ), mostrando-se útil para o mapeamento de queimadas.

Na região do infravermelho médio (de 1,3 a 3  $\mu\text{m}$ ), a absorção pela água líquida predomina na reflectância espectral das folhas. Sendo assim, a ocorrência de queimadas em áreas de floresta acarreta um aumento da reflectância, devido à perda de água pela vegetação. Ao contrário da vegetação de savana, que tem sua reflectância diminuída, neste caso. Estudos com o uso das bandas 5 (1,55 a 1,75  $\mu\text{m}$ ) e 7 (2,08 a 2,35  $\mu\text{m}$ ) do LANDSAT TM mostraram que mesmo com a elevação da reflectância das áreas queimadas nesta faixa, esta é, ainda, muito menor do que a da vegetação seca (Eva et al., 1998).

Na faixa entre 3 e 5  $\mu\text{m}$ , a radiação é tanto refletida como emitida. Deste modo, a região em torno de 3,7  $\mu\text{m}$ , da banda 3 do AVHRR, é especialmente complexa por conter informações tanto do espectro eletromagnético refletido quanto do emitido (França, 2004). Apesar disto, ela é considerada como a melhor banda deste sensor para a detecção de queimadas (Pereira, 1987), devido ao fato de que o imageamento de incêndios neste intervalo torna possível a detecção das frentes de incêndio e manchas quentes através de fumaça.

No que se refere à faixa espectral do infravermelho termal, que engloba comprimentos de onda entre 7 e 15  $\mu\text{m}$ , as emissões tendem a aumentar após a ocorrência das queimadas, devido à elevação da temperatura do solo, provocada pela redução da evapotranspiração e pelo aumento da absorvância da superfície. Deste modo, esta característica pode ser identificada em canais termais, como a banda 6 do TM e as bandas 4 e 5 do AVHRR.

#### **4. Utilização de satélites de alta resolução**

Os satélites LANDSAT e SPOT possuem grande potencial para o mapeamento de áreas queimadas, pois seus dados de fina resolução espacial podem ser utilizados em diversos estudos para a classificação e a interpretação da cobertura da terra, além da distinção entre áreas queimadas e não-queimadas. A presença de uma banda na faixa espectral do infravermelho de ondas curtas, SWIR, (1,55 a 1,75  $\mu\text{m}$ , no LANDSAT TM, e 1,50 a 1,75  $\mu\text{m}$ , no SPOT-4 HRVIR) é outro fator que os torna apropriados para esta aplicação.

A eficiência do LANDSAT TM, pós-queimadas, tem sido demonstrada em países temperados (Phulpin et al., 2002). A sua alta resolução espacial, de 30 m, inclui um canal no infravermelho médio (2,08 a 2,35  $\mu\text{m}$ ), o que permite a detecção de incêndios. Os canais do visível e infravermelho próximo, designados para o estudo de vegetação, possibilitam a detecção de marcas de queimadas e a avaliação do estado da vegetação através de índices de vegetação. Do mesmo modo, os canais nas faixas do visível e infravermelho próximo do sensor MSS, do satélite LANDSAT, também são úteis para o mapeamento de cicatrizes deixadas por queimadas. Além disso, o banco de dados históricos obtidos pelo MSS, nos últimos trinta anos, representa uma importante fonte de informações a respeito das queimadas. Porém, devido a sua passagem somente na parte da manhã, no Hemisfério Sul, e a sua baixa resolução temporal – com tempo de revisita de 16 dias – o satélite LANDSAT não é indicado para o monitoramento deste fenômeno.

##### **4.1. O uso dos sensores HRVIR e VEGETATION do satélite SPOT-4**

O satélite SPOT-4 carrega dois instrumentos de alta resolução, denominados HRVIR, com resolução espacial de 10 m, no modo pancromático, e de 20 m, no multiespectral. A sua largura de imageamento é de 120 km (2 x 60 km). Além destes, também se encontra a bordo do satélite o sensor VEGETATION (VGT), que possui quatro bandas espectrais. Os sensores HRVIR e VGT usam a mesma referência geométrica e as bandas espectrais são idênticas, exceto pelo fato de que o último tem uma banda no azul (0,425 a 0,485  $\mu\text{m}$ ) ao invés da banda verde XS-1. Este fato tem grande importância, pois contribui para uma interpretação multiescalar.

Os instrumentos HRVIR possuem um canal no SWIR, entre 1,50 e 1,75  $\mu\text{m}$ . A adição desta nova banda aos instrumentos do satélite SPOT-4 correspondeu a um grande avanço, na medida em que possui sensibilidade para detectar a umidade da superfície, o que possibilita uma melhor interpretação das imagens. Esta banda permite distinguir as áreas queimadas recentemente das marcas de incêndios mais antigas.

A assinatura espectral no SWIR de pixels com vegetação é determinada pela quantidade de água no solo e nas plantas. A reflectância nesta banda aumenta para os solos secos. Assim, nos casos em que o solo é muito aparente, como o de vegetação muito seca ou de árvores esparsas, a assinatura espectral nesta faixa é aumentada, paralelamente ao decréscimo dos valores no infravermelho próximo (Phulpin et al., 2002).

Já o sensor VEGETATION possui largura de imageamento em torno de 2250 km e resolução espacial de 1 km, permitindo a revisita de um dado local a cada 24 horas. Suas características permitem a aquisição de imagens de todo o globo terrestre. Assim, sua principal missão é o contínuo monitoramento operacional da cobertura de vegetação dos continentes, numa escala regional e global.

O VGT possui um leque de tecnologias que possibilitam produzir imagens de alta qualidade, apesar da pobre resolução, com distorção reduzida grandemente. Suas principais vantagens em comparação ao sensor AVHRR do satélite NOAA são: distorção limitada, calibração precisa, aquisição de resolução global de 1 km diariamente e processamento de dados padronizado numa única escala.

Phulpin et al. (2002) mostraram a capacidade operacional dos sensores HRVIR e VGT para avaliar o impacto de incêndios florestais, providenciar estimativas de prejuízos com exatidão e delinear as principais comunidades de vegetação afetadas pelos incêndios. Os dados destes sensores do SPOT-4 foram usados para avaliar os impactos das queimadas que ocorreram em grande escala no estado de Roraima de agosto de 1997 a abril de 1998, agravados pela ocorrência do fenômeno *El Niño*.

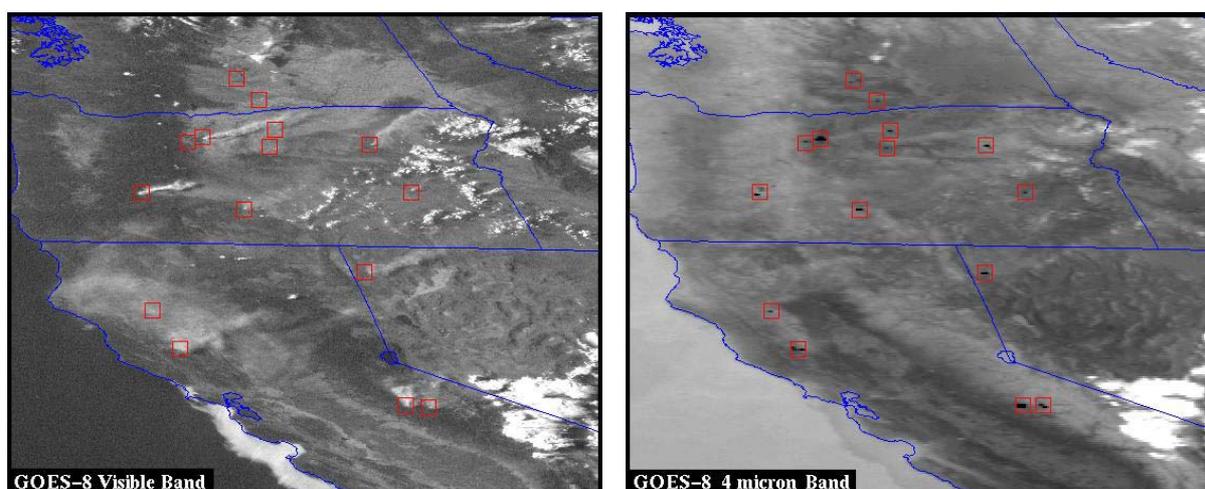
As imagens do VEGETATION foram utilizadas para obter uma primeira estimativa das áreas prejudicadas pelos incêndios numa escala regional, além de uma indicação dos principais ecossistemas afetados. Já os instrumentos HRVIR estabeleceram uma classificação precisa destes ecossistemas. A área queimada mostrada pelo sensor VGT também foi comparada com a estimada pelo HRVIR. Phulpin et al. (2002) concluíram que o uso do VGT foi essencial para a aquisição de imagens livres de nuvens, correspondendo a um importante recurso para o alerta e monitoramento de incêndios em florestas tropicais. Entretanto, ressaltaram que a descrição global dos impactos das queimadas é insuficiente para uma avaliação precisa dos ecossistemas prejudicados e da emissão de carbono. Desta forma, é necessária a utilização de dados de satélites com maior resolução espacial para a identificação e a delimitação de cada ecossistema, permitindo a avaliação do nível de degradação em cada um deles. O uso combinado dos sensores do SPOT-4 possibilitou mostrar que os diversos tipos de vegetação existentes na Floresta Amazônica são queimados em diferentes graus. Através dos dados adquiridos pelo VGT e pelo HRVIR, eles também obtiveram estimativas de biomassa queimada, para as diversas classes de vegetação, e do potencial de emissão de carbono, necessárias a muitos modelos de mudanças globais.

## **5. Utilização de satélites meteorológicos**

Os satélites meteorológicos, apesar de possuírem baixa resolução espacial, têm colaborado grandemente para a detecção e monitoramento de queimadas, em diversas partes do planeta. Isto se deve ao fato de serem capazes de cobrir regiões muito extensas, além de oferecerem

uma alta repetitividade, que é muito útil em locais que estão frequentemente encobertos por nuvens, como no caso da Amazônia.

Deste modo, satélites como o GOES, que possui órbita geoestacionária, podem ser usados operacionalmente para a detecção e o acompanhamento de incêndios em grandes áreas da superfície da Terra. Os seus sensores operam em cinco canais espectrais: um no visível (0,55 a 0,75  $\mu\text{m}$ ), três na região do infravermelho (3,8 a 4,0  $\mu\text{m}$ , 10,2 a 11,2  $\mu\text{m}$ , 11,5 a 12,5  $\mu\text{m}$ ) e um de vapor d'água (6,5-7,0  $\mu\text{m}$ ). As faixas no visível e infravermelho possibilitam detectar fumaça e focos de incêndio (**figura 1**). Porém, devido à resolução espacial relativamente pequena (de 1 km no canal visível e 4 km nos canais do infravermelho), a extensão de incêndios não pode ser avaliada com exatidão e nem os ecossistemas queimados, afetados pelo fogo, podem ser identificados por este satélite.

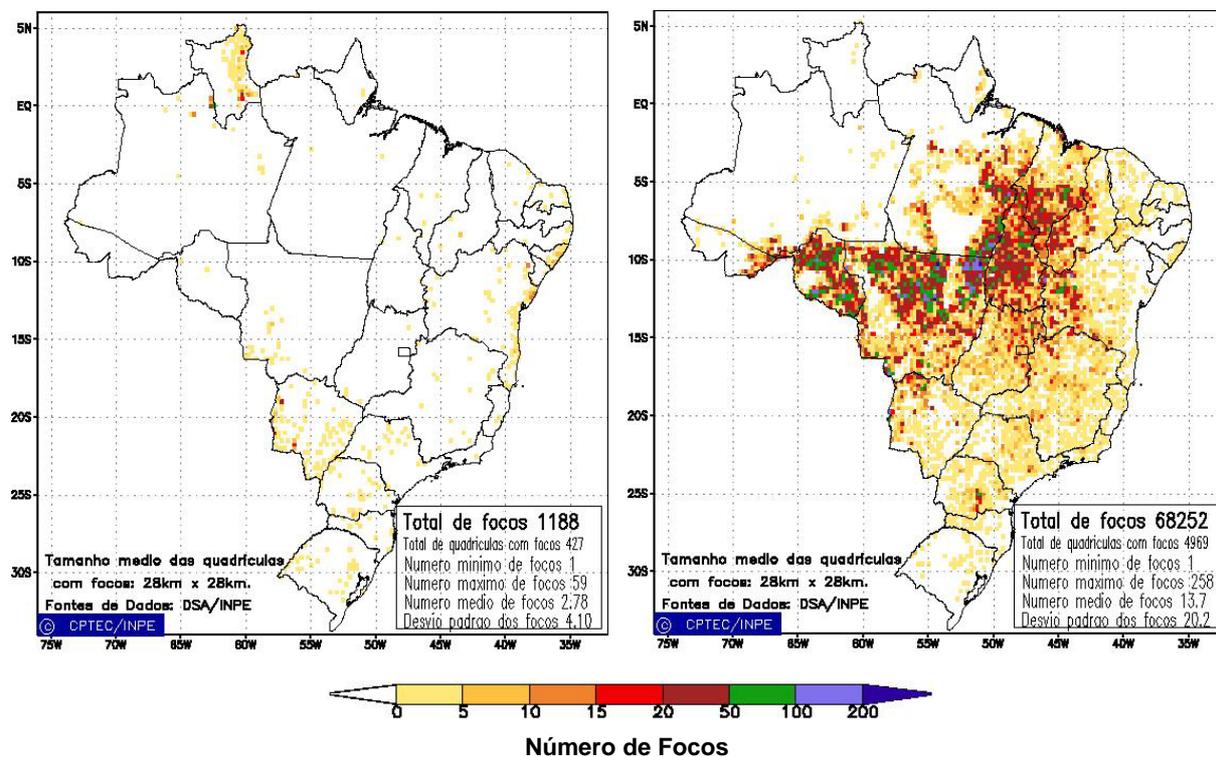


**Figura 1:** Detecção de plumas de fumaça (esquerda) e incêndios (direita) no oeste dos Estados Unidos, no dia 16 de agosto de 1996, pelo satélite GOES-8.

No que se refere ao uso de satélites de órbita polar, os da série NOAA tem como carga útil o sensor AVHRR, que é muito utilizado para estudos de vegetação e de incêndios. Este sensor possui cinco canais, distribuídos da seguinte forma: canal 1 no visível (0,6  $\mu\text{m}$ ), canal 2 no infravermelho próximo (0,9  $\mu\text{m}$ ), canal 3 na faixa em torno de 3,7  $\mu\text{m}$  e os canais 4 e 5 no infravermelho termal (10,8  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ , respectivamente).

Apesar de apresentar resolução espacial de 1 km – mais grosseira que a de satélites como SPOT e LANDSAT – o AVHRR possui características que se adaptam muito bem ao monitoramento de queimadas, especialmente no Brasil (**figura 2**). Uma delas é o seu canal 3, na faixa de 3,55 a 3,93  $\mu\text{m}$ , particularmente sensível às temperaturas de combustão da vegetação (Pereira et al., 2004). Este fato permite a detecção de frentes de fogo da ordem de 30 m, muito menores que sua resolução.

Outras características importantes do sensor são a largura de imageamento, que é de aproximadamente 2700 km, possibilitando uma ampla cobertura espacial de praticamente todo o território brasileiro em apenas uma imagem, e a alta frequência temporal com pelo menos uma imagem no período vespertino e outra de madrugada. Como existem tipicamente pelo menos dois satélites NOAA operacionais, a detecção de queimadas pode ser feita no mínimo quatro vezes ao dia. Vale lembrar, ainda, que os dados do sensor AVHRR se constituem como uma importante série histórica para os estudos sobre as queimadas, pois têm sido coletados pela NOAA desde o ano de 1978.



**Figura 2:** Mapas de total mensal de focos de queimadas no Brasil, detectados pelo satélite NOAA-12, referentes aos meses de fevereiro (esquerda) e setembro (direita) de 2004.

Entretanto, a resolução espacial de 1 km também corresponde a uma limitação deste sensor, pois possibilita que algumas áreas com ocorrência de incêndios sejam subestimadas ou superestimadas. Segundo França (2004), as consequências desta resolução no mapeamento de queimadas dependem do tamanho e do grau de fragmentação da superfície queimada. Assim, marcas pequenas poderiam não ser identificadas e as detectáveis, mas de tamanho inferior à área do pixel, teriam suas áreas superestimadas. Quanto à distribuição espacial, as queimadas pequenas e esparsas provavelmente não seriam detectadas, enquanto que aquelas localizadas próximas umas das outras poderiam ser identificadas como uma única.

## 6. Considerações finais

Atualmente ainda não há um único satélite que possua resoluções espacial, temporal e espectral adequadas para o mapeamento e monitoramento do fenômeno das queimadas. Uma tentativa para a solução deste problema poderia ser a calibração das estimativas de áreas queimadas, provenientes de sensores de resolução espacial grosseira, com base em imagens de satélites de fina resolução. Assim, torna-se necessária a utilização dos diferentes sistemas sensores disponíveis de forma integrada, além de uma variedade de técnicas de análise, a fim de se obter resultados mais confiáveis nos estudos acerca deste tema.

## 7. Referências bibliográficas

Eva, H.; Lambin, E. F. Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 3, p. 292-315, 1998.

França, H. Identificação e mapeamento de cicatrizes de queimadas com imagens AVHRR/NOAA. In: Ferreira, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 57-78.

Justice, C.; Malingreau, J; Setzer, A. W. Satellite remote sensing of fires: potential and limitations. In: **Ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires**. John Wiley and Sons, 1993. p. 77-88. Publicado como: INPE-7607-PRE/3458.

Pereira, M. C. **Deteção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e LANDSAT e dados de aeronave**. 1987. 268 p. (INPE-4503-TDL/326). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1987.

Pereira, M. C.; Fernandes, A. E.; Braga, R. A.; Silva, R. A. B. e. Deteção de queimadas com o uso do radiômetro AVHRR. In: Ferreira, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 41-55.

Phulpin, T.; Lavenu, F.; Bellan, M. F.; Mougnot, B.; Blasco, F. Using SPOT-4 HRVIR and VEGETATION sensors to assess impact of tropical forest fires in Roraima, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 10, p. 1943-1966, 2002. Publicado como: INPE-4503-TDL/326.