

---

# METODOLOGIAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE DE QUEIMADAS COM BASE EM ÍNDICES ESPECTRAIS E DIAGNÓSTICO DE SEVERIDADE

REMOTE SENSING METHODOLOGIES FOR BURNING ANALYSIS  
BASED ON SPECTRAL INDEXES AND SEVERITY DIAGNOSIS

METODOLOGÍAS DE SENSIÓN REMOTA PARA EL ANÁLISIS DE QUEMADURAS  
BASADO EN ÍNDICES ESPECTRALES Y DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD

Ana Beatriz Neves da Silva<sup>1</sup>  
Norma Ely Santos Beltrão<sup>2</sup>

---

**RESUMO:** O fogo pode causar diferentes graus de destruição em uma área afetada e para identificar os níveis de severidade dos seus danos foram criados índices espectrais que analisam esta área utilizando imagens de satélite e sensoriamento remoto. O objetivo deste trabalho foi determinar quais os índices espectrais disponíveis para avaliação do grau de severidade das queimadas e identificar as imagens de satélite mais adequadas para estudos dessa natureza. Verificou-se que para analisar queimadas, o ideal é utilizar imagens de satélite que combinem altas resoluções espaciais e temporais, como a combinação de imagens Landsat-7 e 8 ou Sentinel-2 com MODIS, dessa forma poderão ser identificadas áreas com fogo ativo ou ocorridas há pouco tempo, não omitindo áreas com pequenas dimensões. Quanto aos índices espectrais, o Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada – RdNBR, mostrou-se mais adequado para analisar a severidade de queimadas, independentemente das condições de vegetação anterior ao fogo.

**Palavras-chave:** NBR. MODIS. Landsat. Sentinel-2.

**ABSTRACT:** Fire can cause different degrees of destruction in an affected area and to identify the severity levels of its damage, spectral indices have been created that analyze this area using satellite images and remote sensing. The objective of this work was to determine which spectral indices are available to assess the degree of severity of the fires and to identify the most suitable satellite images for studies of this nature. It was found that to analyze fires, the ideal is to use satellite images that combine high spatial and

---

1 Especialista em Projetos Sustentáveis, Mercado de Carbono e Mudanças Climáticas pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e graduada em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Atualmente é mestranda em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado do Pará (UEPA). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9560-4645>. E-mail: anabenevess@gmail.com.

2 Doutora em Economia Agrícola na Justus-Liebig-Universität Giessen na Alemanha. Mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é professora efetiva da Universidade do Estado do Pará (UEPA). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1991-2977>. E-mail: normaely@uepa.br.

Artigo recebido em abril de 2021 e aceito para publicação em agosto de 2021.

temporal resolutions, such as the combination of Landsat-7 and 8 images or Sentinel-2 with MODIS, in this way areas with active fire can be identified or recently occurred, not omitting areas with small dimensions. As for spectral indices, the Differentiated Relative Index of Burning for Normalized Reason - RdNBR, proved to be more adequate to analyze the severity of fires, regardless of the vegetation conditions before the fire.

**Keywords:** NBR. MODIS. Landsat. Sentinel-2.

**RESUMEN:** El fuego puede causar diferentes grados de destrucción en una zona afectada y para identificar los niveles de gravedad de su daño se han creado índices espectrales que analizan esta zona mediante imágenes de satélite y teledetección. El objetivo de este trabajo fue determinar qué índices espectrales están disponibles para evaluar el grado de severidad de los incendios e identificar las imágenes de satélite más adecuadas para estudios de esta naturaleza. Se encontró que para analizar incendios lo ideal es utilizar imágenes satelitales que combinen altas resoluciones espaciales y temporales, como la combinación de imágenes Landsat-7 y 8 o Sentinel-2 con MODIS, de esta manera se pueden identificar áreas con fuego. identificadas, activas o ocurridas recientemente, sin omitir áreas de pequeñas dimensiones. En cuanto a los índices espectrales, el Índice Relativo Diferenciado de Quema por Razón Normalizada - RdNBR, resultó ser más adecuado para analizar la severidad de los incendios, independientemente de las condiciones de la vegetación antes del incendio.

**Palabras clave:** NBR. MODIS. Landsat. Sentinel-2.

## INTRODUÇÃO

Diversos fatores podem influenciar nos processos de queimada tais como a saúde da vegetação, históricos de degradação na área e no entorno, o clima, topografia, e a qualidade do solo (ALENCAR *et al.*, 2015; FARIAS *et al.*, 2017). As vegetações reagem de maneiras diferentes ao fogo de acordo com as suas sensibilidades a altas temperaturas e características da espécie, apresentando níveis de gravidades ou severidades diferentes (VERAVERBEKE *et al.*, 2018).

Tendo o conhecimento da singularidade de cada incêndio florestal, diversos autores (CHUVIECO *et al.*, 2004; ROY *et al.*, 2005; KEY; BENSON, 2006; ROY; BOSCHETTI; TRIGG, 2006; MILLER; THODE, 2007; GIGLIO *et al.*, 2009; GIGLIO *et al.*, 2018; ROTETA *et al.*, 2019) propuseram índices, algoritmos e métodos para se identificar queimadas, analisar gravidade do impacto na vegetação, e a sua regeneração utilizando sensoriamento remoto e imagens de diferentes satélites para o monitoramento das áreas.

A utilização de informações espectrais de imagens de satélite são ferramentas comumente usadas para dimensionar a extensão de incêndios florestais, mapear as cicatrizes de queimadas, bem como determinar a severidade da queimada e o processo de regeneração florestal (ROY *et al.*, 2005; ROTETA *et al.*, 2019). As ferramentas permitem que o analista consiga obter uma variedade de informações preliminares sobre a área da ocorrência da queimada, acelerando o processo de tomada de decisão e permitindo que estudos sejam realizados em áreas de grandes dimensões e com pouca ou nenhuma necessidade de ir a campo (FRANKLIN, 2001; CARDIL *et al.*, 2019). O sensoriamento

tem utilidade comprovada para analisar todos os estágios temporais de perturbação de incêndios, fornecendo em um único meio a capacidade de monitorar queimadas em escala global (VERAVERBEKE *et al.*, 2018).

A detecção de incêndios ativos é realizada principalmente no contraste térmico entre as queimadas e o fundo, enquanto a detecção de áreas queimadas/pós-incêndio/pós-fogo é baseada nos efeitos do fogo na refletância da vegetação (SCHROEDER *et al.*, 2014; SCHROEDER *et al.*, 2016; GIGLIO *et al.*, 2016; ROTETA *et al.*, 2019). A partir da refletância dos objetos, os sensores podem obter suas informações espectrais que variam quanto à forma, ao tipo de vegetação, ao teor de água presente, a saúde, entre outros fatores, o que permite a sua identificação e classificação (CHANG; PENG-SEM; SHI-RONG, 2016; XUE; SU, 2017).

No Brasil, mais especificamente na Amazônia Legal Brasileira, o desmatamento e as queimadas são monitorados e estimados pelos programas Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite - PRODES e o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real - DETER (INPE, 2019). São utilizadas predominantemente imagens de satélite Landsat de resolução espacial de 20 a 30 metros e taxa de revisita de 16 dias. Atualmente os programas também fazem uso de CBERS 4 e IRS-2 (INPE, 2019). Contudo, satélites como o Sentinel 2 detêm sensores capazes de fornecer imagens com melhores resoluções espaciais e espectrais comparado ao Landsat, o que pode fazer grande diferença nas análises ambientais (ASTOLA *et al.*, 2019).

Reconhecendo a importância de explorar novas ferramentas e metodologias capazes de diagnosticar o solo e a vegetação pós-queimadas, este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico exploratório do uso de técnicas de sensoriamento remoto para esse fim. Buscou-se, como objetivos específicos, determinar quais índices espectrais estão disponíveis para avaliação do grau de severidade das queimadas e identificar o conjunto as imagens de satélite mais adequadas para estudos dessa natureza.

## **METODOLOGIA**

A metodologia deste artigo consiste de uma abordagem qualitativa tendo como base fontes bibliográficas para apresentar, majoritariamente, aspectos conceituais e de características referentes ao tema proposto, tendo como eixo norteador o uso de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para análise de queimadas, dando ênfase nos seguintes assuntos: (1) gravidade de queimadas, (2) satélites e sensores e (3) índices espectrais. Para isso, foram utilizadas fontes secundárias nacionais e internacionais como artigos científicos publicados em periódicos, trabalhos acadêmicos, sites de grandes instituições e projetos de pesquisas em andamento.

## **RESULTADOS**

### **Gravidade de queimadas**

De acordo com Key e Benson (2006), a gravidade do incêndio pode ser definida como grau de mudança ambiental causada pelo fogo, imediatamente após o incêndio. Estas mudanças podem ter ainda efeitos posteriores ao fogo nas comunidades ecológicas que compõem a paisagem, com efeitos no solo e na vegetação (KEY; BENSON, 2006;

MORGAN *et al.*, 2014). As alterações ocorridas após o fogo ocasionam mudanças físicas e químicas do solo, e convertem a vegetação e combustíveis em carbono inorgânico, transformando a paisagem e alterando o microclima (KEY; BENSON, 2006; VERAVERBEKE *et al.*, 2010).

A gravidade da queima pode ser mensurada em diferentes aspectos ecológicos, dependendo dos objetivos do estudo. No sentido amplo seria o grau de mudança, o impacto imediato do fogo na vegetação e a sua recuperação de longo prazo (VERAVERBEKE *et al.*, 2018). A sensibilidade e as características de cada ecossistema influenciam no grau de gravidade da queimada, sendo diferente as reações do fogo em florestas densas e pastagens, florestas tropicais, boreais e temperadas (TURETSKY *et al.*, 2011; ROGERS *et al.*, 2014; VERAVERBEKE *et al.*, 2018).

Em períodos de seca, a vegetação se torna mais suscetível a queimadas, pois a diminuição de umidade no solo e no ar tornam a floresta mais inflamável, aumentando dessa forma a ocorrência de queimadas de maior extensão e gravidade (NEPSTAD *et al.*, 2004; ROY *et al.*, 2005; PAUSAS; BRADSTOCK, 2007; FARIAS *et al.*, 2017). Os incêndios podem ter início tanto naturalmente, quanto por ação antrópica, contudo as atividades humanas têm sido apontadas como as principais causas para o aumento de queimadas e alterações do regime do fogo (NEPSTAD *et al.*, 2014; MORTON *et al.*, 2013; ALENCAR *et al.*, 2015).

Veraverbeke *et al.* (2018) dividem em três fases temporais o processo de perturbação pelo fogo, os ambientes pré-incêndio, ativo e pós-incêndio (Figura 1). O ambiente pré-incêndio/pré-fogo, se refere as condições do ambiente e do tipo de combustível presente na área antes da perturbação pelo fogo, essas condições determinam a necessidade de fontes de ignição para o processo de queimada, tornando o ambiente mais ou menos inflamável (FARIAS *et al.*, 2017; VERAVERBEKE *et al.*, 2018).



Fonte: Veraverbeke *et al.* (2018).

**Figura 1.** Fases temporais da perturbação do fogo.

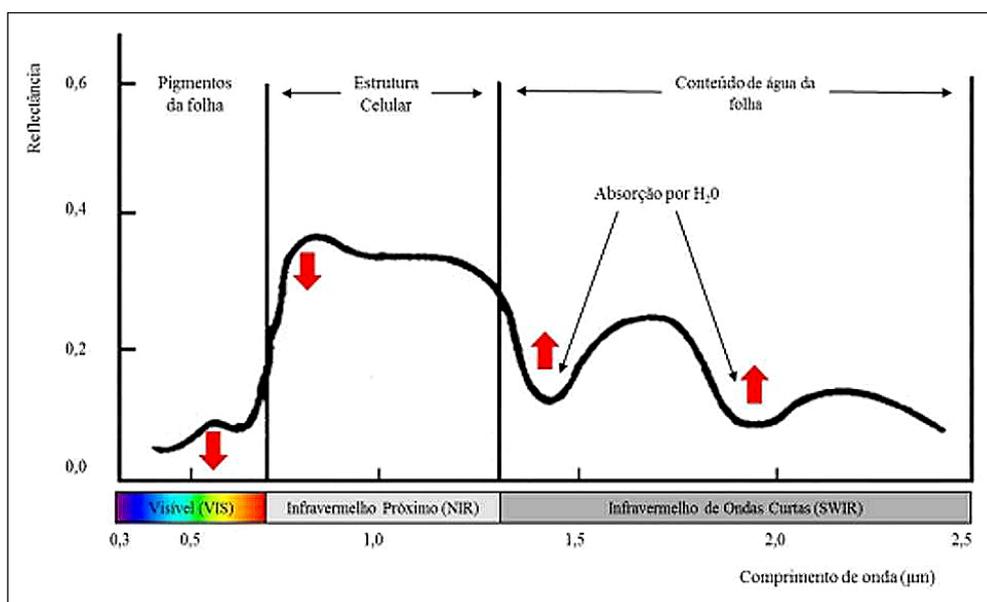
O ambiente de fogo ativo, é a fase em que o fogo se desloca pela paisagem consumindo a vegetação, e a intensidade desse fogo é influenciada pela topografia, combustíveis e clima do local (VERAVERBEKE *et al.*, 2018). A intensidade do fogo descreve o processo de combustão física da liberação de energia da matéria orgânica, é o estado do fogo durante a combustão, o nível de calor produzido pelo fogo (KEY; BENSON, 2006; KEELEY, 2009). Com a mesma intensidade de fogo uma vegetação pode ter danos mais severos do que outra, tendo em vista a sensibilidade ao fogo e características fisiológicas de cada espécie (KEY; BENSON, 2006; CARDIL *et al.*, 2019).

O ambiente pós-incêndio/pós-fogo é o período após a extinção do fogo, são as condições do ambiente após as queimadas (VERAVERBEKE *et al.*, 2018). Nesse momento pode-se identificar os efeitos que o fogo causou na vegetação e no solo, e determinar a gravidade e/ou a severidade da queima (MORGAN *et al.*, 2014; VERAVERBEKE *et al.*, 2018).

## Satélites e Sensores

O uso do sensoriamento remoto no estudo de queimadas se direciona principalmente para dois produtos do fogo, a detecção de cicatriz de queimada e a detecção de fogos ativos, sendo a primeira identificada nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas, e infravermelho médio, já a segunda utilizam-se sensores com bandas centradas na faixa do infravermelho termal (LIMA *et al.*, 2013).

Alguns autores apontam as regiões espectrais NIR e SWIR como as mais sensíveis pelas alterações do fogo (PEREIRA *et al.*, 1999; TRIGG; FLASSE, 2000; CHUVIECO *et al.*, 2019). O incêndio em uma região pode reduzir o índice de área foliar e/ou diminuir a pigmentação e desidratar a vegetação (CHUVIECO *et al.*, 2019). Essas alterações na composição vegetal trarão mudanças na sua reflectância. Uma área vegetada sem ter sofrido com a influência de queimadas apresenta um comportamento espectral de alto NIR e baixo SWIR, já após a queimada, os primeiros efeitos no comportamento espectral são a diminuição da reflectância do NIR e aumento do SWIR. (Figura 2.) (PESSOA *et al.*, 2015; TEIXEIRA, 2020).



Fonte: Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2007).

**Figura 2.** Comportamento espectral da vegetação.

Após a ocorrência dos incêndios, a persistência do contraste de sinalização da reflectância da área queimada é curta em ecossistemas tropicais (1-3 semanas) (TRIGG; FLASSE, 2000), enquanto em regiões boreais e temperadas os sinais podem durar vários anos (KASISCHKE; FRENCH, 1999). A detecção das alterações da reflectância da vegetação após a queimada por meio de imagens de satélite, apresenta respostas espectrais específicas, as quais podem ser utilizadas em índices espectrais propostos por alguns pesquisadores e que permitirão identificar a gravidade do incêndio entre outras análises ambientais (TEOBALDO, 2013).

Terra e Aqua – O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua, da NASA, visualizam a superfície da Terra a cada 1 a 2 dias, adquirindo dados em 36 bandas espectrais e resoluções espaciais de 250m (bandas 1-2), 500m

(bandas 3-7) e 1000m (bandas 8-36) (NASA, 2020). O lançamento do MODIS/Terra (1999) e MODIS/Aqua (2002) criou grandes expectativas quanto a produtos de áreas queimadas de alta qualidade a nível global (LIMA *et al.*, 2013; LIZUNDIA-LOIOLA *et al.*, 2020).

Foram gerados dois produtos globais de áreas queimadas a partir dos dados do MODIS, como o MCD45 e o MCD64, os quais são baseados em algoritmos diferentes e ambos possuem resolução de 500m (LIZUNDIA-LOIOLA *et al.*, 2020). O MCD45 utiliza as bandas 2 (NIR 841-876 nm) e 5 (SWIR 1230–1250 nm) e tem informações para os anos 2001-2016 (ROY *et al.*, 2005). Já o MCD64 usa uma abordagem híbrida, combinando incêndios ativos com mudanças em um índice de vegetação gerado nas bandas 5 e 7 (SWIR 2105–2155 nm) e é o produto padrão da NASA de áreas queimadas, com informações de 2001 – até o presente (GIGLIO *et al.*, 2009; GIGLIO *et al.*, 2018). O FireCCI50, é outro produto do MODIS com base em refletâncias de infravermelho próximo e vermelho de 250 m (CHUVIECO *et al.*, 2018).

Os produtos do MODIS são amplamente utilizados para a detecção de fogos ativos e produtos pós-fogo, sendo a sua resolução temporal uma de suas principais vantagens, pois gera novas imagens a cada 1-2 dias. Seus produtos representam muito bem a distribuição espacial e temporal do fenômeno de queimada, contudo, devido a sua grande resolução espacial os produtos de cicatriz de queimadas tendem a subestimar a extensão da área (LIMA *et al.*, 2013; CHUVIECO *et al.*, 2018). Devido ao tamanho dos pixels, a detecção de pequenos incêndios (<100ha) podem passar despercebidos pelo MODIS, e essas omissões causam uma subestimação de queimadas e de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera (ROTETA *et al.*, 2019).

Landsat – a série de satélites Landsat teve início nos anos 70 e oferece o mais longo registro global contínuo da superfície da Terra (NASA, 2020). Ao todo foram lançados 8 satélites com imagens multiespectrais e a série apresenta uma coleção de imagens espaciais e temporais consistente, com resolução de 30 m desde 1982 (DALDEGAN; ROBERTS; RIBEIRO, 2019). Dos oito satélites lançados, dois continuam em funcionamento, o Landsat-7 ETM+ e o Landsat-8 Operational Land Imager (OLI).

O sensor OLI do Landsat 8 fornece imagens com qualidade superior comparado aos anteriores, possui 9 bandas tendo como novidade a Banda 1 (azul profundo e violeta) com um comprimento de onda mais curto (0,43–0,45  $\mu\text{m}$ ) e a Banda 9 cobrindo uma faixa muito curta de comprimentos de onda no infravermelho de ondas curtas (1,36-1,39 $\mu\text{m}$ ), também chamada de banda Cirrus devido à sua capacidade de detecção de cobertura de nuvens (MANCINO *et al.*, 2020).

A série de satélites Landsat é amplamente utilizada em análises de respostas espectrais da vegetação e para o mapeamento das transformações de uso e cobertura do solo ao longo de séries históricas (MANCINO *et al.*, 2020). Contudo, devido a algumas mudanças nas resoluções espaciais e espectrais dos sensores conforme o lançamento dos satélites mais atuais, alguns índices não apresentam um bom desempenho em séries históricas (TEILLET *et al.*, 2007). Porém, análises com os sensores ETM + do Landsat-7 e OLI do Landsat-8 tem apresentado bons resultados com alta correlação, principalmente em índices espectrais que utilizam o Infravermelho Próximo – NIR e o Infravermelho de Ondas Curtas – SWIR, tais como Land Surface Water Index (LSWI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Normalized Burn Ratio (NBR) (XU; GUO, 2014; MISHRA *et al.*, 2014; LI; JIANG; FENG; 2014).

O mapeamento de cicatrizes de fogo com imagens Landsat tem sido a preferência por pesquisadores no estudo de áreas queimadas, pois a resolução espacial mais fina dos sensores

permite que fragmentos de incêndio de tamanhos menores sejam mais bem delimitados, comparado a produtos de resolução espacial mais grosseira como o MODIS (BASTARRIKA *et al.*, 2014; BOSCHETTI *et al.*, 2015; QUINTANO *et al.*, 2017; HAWBAKER *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2018). Porém, uma das principais limitações do uso desses sensores para mapeamento de áreas queimadas é sua relativamente baixa resolução temporal (8 dias se ambos Landsat-7 e 8 forem usados), o que em regiões com elevada cobertura de nuvens, como em ecossistemas tropicais, torna a detecção de áreas queimadas desafiadora, tendo em vista o curto período pós-incêndio para a persistência do sinal (ROTETA *et al.*, 2019).

A missão Sentinel-2 – Desenvolvida pela Agência Espacial Europeia – ESA, é composta por dois satélites, o S2-A (lançado em junho de 2015) e S2-B (lançado em março de 2017) e seu principal sensor é o *MultiSpectral Instrument* – MSI (ESA, 2020). Apresenta resolução espectral de 13 bandas, fornecendo ampla cobertura sobre os domínios do visível, infravermelho próximo - NIR e infravermelho de onda curta - SWIR, com resolução espacial média (de 10 m a 60 m dependendo do comprimento de onda) e o tempo de revisita de cada satélite é de 10 dias e a cada 5 dias com os dois satélites (ROTETA *et al.*, 2019).

As bandas espectrais presentes no MSI a bordo dos satélites Sentinel-2A e 2B apresentam bom desempenho para mapear manchas queimadas (HUANG *et al.*, 2016; ROTETA *et al.*, 2019). A maior resolução espacial e temporal do Sentinel-2 tem atraído o interesse de pesquisadores de incêndios, que visam utilizar dados que possam fornecer as melhores informações para a avaliação da gravidade de queimadas (GARCÍA-LLAMAS *et al.*, 2019).

## Índices espectrais

O uso de imagens multiespectrais combinados com índices espectrais de severidade das queimadas são ferramentas importantes para avaliar o impacto do fogo nos ecossistemas florestais (KEEYLEY, 2009; MORGAN *et al.*, 2014). Os índices espectrais normalmente utilizados em sensoriamento remoto para analisar a gravidade dos incêndios florestais são o NBR, o dNBR e o RdNBR (CARDIL *et al.*, 2019).

*Burn Area Index* (BAI) – O Índice de Área Queimada – BAI, desenvolvido por Martín e Chuvieco (1998), é um índice baseado nas bandas Vermelha (Red) e Infravermelho Próximo (NIR).

$$BAI = \frac{1}{(0,1 - Red)^2 + (0,06 - NIR)^2} \quad (1)$$

O índice BAI foi elaborado para destacar a resposta espectral de alvos carbonizados em imagens pós-fogo (PENHA, 2018; CHUVIECO; MART; PALACIOS, 2002). Contudo, alguns estudos, como o de Pereira *et al.* (2015) no Cerrado, não apresentaram boa separabilidade entre os pixels de áreas queimadas e não queimadas.

*Normalized Burn Ratio* (NBR) – o Índice de Queima por Razão Normalizada - NBR, desenvolvido por Key e Benson (2006), utiliza as bandas do Infravermelho Próximo - NIR e Infravermelho de Ondas Curtas – SWIR. O NBR determina a escala de gravidade de uma queimada por meio da diferença normalizada, Equação (2), entre a reflectância do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas e tem como resultado um melhor contraste entre a vegetação queimada e a vegetação saudável (ALLEN; SORBEL, 2008; TEOBALDO, 2013).

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \times 1000 \quad (2)$$

O NBR, segundo Roy, Bochetti e Trigg (2006) apresenta deslocamento espectrais devido a queima e ocorrem em várias direções, sugerindo que o índice pode não ser primária e consistente sensível à gravidade do fogo. Os autores sugerem o desenvolvimento de métodos para estimar a severidade do fogo que incorporem conhecimento de como fogos de diferentes severidades deslocam a posição da vegetação pré-fogo no espaço multiespectral (ROY; BOSCHETTI; TRIGG, 2006).

*Differenced Normalized Burn Ratio* (dNBR) – o Índice Diferenciado de Queima por Razão Normalizada – dNBR, Equação (3) compara os dados NBR pré-fogo, antes da queimada, e os dados de NBR pós-fogo, depois da queimada com o intuito de isolar a mudança provocada pela queimada (ALLEN; SORBEL, 2008).

$$dNBR = NBR (pré - fogo) - NBR (pós - fogo) \quad (3)$$

Segundo com Key e Benson (2006), o dNBR pode variar no intervalo de 2000 ou -2000, contudo raramente ultrapassa uma faixa de -500 a 1200 sobre superfícies queimadas (Tabela 1). As áreas que não sofreram alterações pelo fogo têm valores próximos de zero, já áreas que foram afetadas pelo fogo podem ter valores fortemente positivos ou fortemente negativos, dependendo da vegetação. De acordo com os autores, em áreas de que predominam herbáceas a severidade é leve e efêmera, e a vegetação queimada responde rapidamente com vigor renovado pela liberação de nutrientes ou outros fatores após o fogo, portanto terá o dNBR negativo. O dNBR fortemente positivo, entretanto, é mais típico em áreas florestadas e dominadas por arbustos onde o fogo geralmente cria conversões de biomassa mais duradouras, tornando a vegetação sucessiva menos produtivos ou anteriores (KEY; BENSON, 2006).

**Tabela 1.** Níveis de severidade.

Nível de Severidade	Dnbr
Alto crescimento da vegetação	-500 a -251
Baixo crescimento da vegetação	-250 a -101
Áreas estáveis ou não queimadas	-100 a 99
Severidade baixa	100 a 269
Severidade moderada-baixa	270 a 439
Severidade alta-moderada	440 a 659
Severidade alta	660 a 1300

Fonte: Adaptado de Key e Benson (2006).

*Relative Differenced Normalized Burn Ratio* (RdNBR) – o Índice Relativo Diferenciado de Queimada por Razão Normalizada - RdNBR (MILLER et al., 2009) é uma variação da Taxa de Queima Normalizada Diferenciada (dNBR) que considera a quantidade relativa de mudança pré e pós-incêndio dividindo dNBR pelo valor de NBR pré-incêndio (Equação 4). Este índice foi proposto para remover o viés devido ao tipo e densidade da vegetação pré-incêndio (MILLER et al., 2009; CARDIL et al., 2019).

$$RdNBR = \frac{(NBR \text{ pré} - \text{fogo} - NBR \text{ pós} - \text{fogo})}{\sqrt{ABS\left(\frac{NBR \text{ pré} - \text{fogo}}{1000}\right)}} \quad (4)$$

*Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) – O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada proposto por Rouse et al. (1973) permite identificar a presença de vegetação verde sadia a partir do seu brilho do solo de fundo obtido por sensores e utilizando as bandas do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (Red) (LOBATO et al., 2010; MONTEIRO, 2013; LEAL et al., 2019). O índice é calculado por meio da diferença normalizada entre a reflectância da banda do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância da banda do vermelho e os seus resultados estão compreendidos no intervalo de -1 a 1, tendo os valores próximos de 1 as melhores condições de vegetação (Equação 5).

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (5)$$

Pereira et al. (1999), encontrou pouca sensibilidade do NDVI para discriminar áreas queimadas e não queimadas. Embora a utilização de índices espectrais que utilizam bandas do visível, como o NDVI, não demonstrem alta sensibilidade ao efeito do fogo, alguns autores afirmam que podem ser úteis para monitorar a regeneração da vegetação pós fogo (SILJESTRÖM RIBED; MORENO LOPEZ, 1995; LEAL et al., 2019).

## DISCUSSÃO

Diversos pesquisadores (GIGLIO et al., 2009; GIGLIO et al., 2018; ROTETA et al., 2019; ROY et al., 2019; LIZUNDIA-LOIOLA, 2020; BAR et al., 2020) vem desenvolvendo algoritmos, aprimorando metodologias e aplicando índices espectrais em imagens de satélite, visando melhorar a qualidade dos estudos de queimadas. Os produtos de sensoriamento remoto abordado nesse trabalho vêm sendo amplamente estudados por pesquisadores, que buscam desenvolver algoritmos de detecção de cicatrizes de queimadas de melhor qualidade. Contudo, poucos estudos sobre severidade de queimadas e o impacto na vegetação com o uso de sensoriamento remoto foram realizados no Brasil como Teobaldo (2013), Martins e Baptista (2013), Silva e Baptista (2015) e Teixeira (2020), sendo uma temática com espaço para ser explorada.

O uso de imagens de satélite com resoluções temporais, espectrais e espaciais diferentes, como os produtos do Sentinel-2, Landsat-7, Landsat-8 e MODIS, podem aprimorar a base de dados de queimadas, pois ambos têm características importantes para a detecção e mapeamento de

queimadas. O MODIS, com sua alta resolução temporal e bandas termais, permite que incêndios ativos ou que ocorreram e há pouco tempo sejam identificados com rapidez, contudo sua baixa resolução espacial torna seus produtos de cicatriz de queimadas com elevadas omissões, não identificando incêndios de menor porte (ROTETA *et al.*, 2019; ROY *et al.*, 2019).

Por outro lado, o Sentinel-2 e os Landsat- 7 e 8, fornecem imagens com média resolução espacial permitindo um melhor mapeamento de áreas pequenas queimadas, porém, por apresentarem resolução temporal inferior ao MODIS, esses satélites identificam dias de queima, em média, 3 dias após os produtos do MODIS (ROY *et al.*, 2019). Alguns estudos foram realizados comparando a qualidade das imagens do MODIS, Landsat e Sentinel-2, buscando identificar as melhores imagens para a análise de queimadas (ROTETA *et al.* 2019, ROY *et al.*, 2019; GARCÍA-LLAMAS *et al.*, 2019; BAR *et al.*, 2020).

Roteta *et al.* (2019) criaram, em sua pesquisa, o produto FireCCISFD11, o qual detecta cicatrizes de queimada a partir de imagens Sentinel- 2 e comparando os resultados obtidos pelo o produto MCD64A1 do MODIS identificaram que os produtos gerados a partir do Sentinel-2 são mais precisos em análises de períodos mais longos, enquanto o derivado do MODIS é mais preciso na detecção próxima da ocorrência da queima. Contudo, Roteta *et al.* (2019) destacam que por apresentar resolução temporal mais baixa, as imagens Sentinel-2 são mais afetados por nuvens / sombras de nuvens. Por outro lado, o FireCCISFD11 detectou cerca de 80% áreas de queimada a mais do que o produto do MODIS, o que segundo os autores é devido aos pequenos incêndios que o MCD64A1 omite.

A combinação de imagens Sentinel-2 com Landsat-8 para a identificação de queimadas utilizada por Roy *et al.* (2019), indica uma área maior queimada e menor quantidade de pixels não mapeados quando ambos os sensores são usados. Os autores comparam seus resultados com os produtos MODIS e identificam que espacialmente o produto Sentinel-2A e Landsat-8 30 m captura mais detalhes do que o produto MODIS 500 m de área queimada, com estimativas de área queimada sistematicamente mais altas, entretanto, temporalmente o MODIS identifica áreas queimadas com maior agilidade.

García-Llamas *et al.* (2019) aplicaram e compararam índices de sensoriamento remoto para avaliação da gravidade de queimadas com diferentes satélites, e quando comparadas as imagens Sentinel-2 com Landsat-8 verificaram que as imagens do primeiro melhoraram apenas ligeiramente o desempenho dos índices baseados em NBR em comparação com Landsat 8. Os autores do estudo concluíram que há um bom potencial para Landsat 8 OLI / TIRS e Sentinel-2 MSI para avaliação da gravidade de queima em ecossistemas heterogêneos propensos ao fogo (GARCIA-LLAMAS *et al.*, 2019).

Segundo Miller *et al.* (2009), para avaliação de gravidade de queimadas com sensoriamento remoto, a normalização dNBR para produzir um dNBR relativizado (RdNBR) remove o efeito de polarização da condição pré-incêndio, ou seja, o índice remove o viés devido ao tipo e densidade da vegetação pré-incêndio. Dessa forma, o RdNBR é o mais indicado para analisar a severidade de queimadas. Além de que, o RdNBR apresenta bons resultados quando comparados com dados obtidos em campo (MILLER *et al.*, 2009; CARDIL *et al.*; 2019). Cardil *et al.* (2019) destacam a importância da obtenção dos dados de queimadas o mais próximo possível da ocorrência do incêndio, pois o lapso de tempo entre o evento de incêndio e a avaliação da gravidade influencia não apenas a correlação, mas a interpretação do conceito de gravidade.

Áreas que já passaram por queimadas tem maior facilidade de serem incendiadas novamente e tornar o seu entorno mais vulnerável ao fogo (ALENCAR *et al.*, 2015;

FARIAS *et al.*, 2017). Após a ocorrência do primeiro incêndio, os próximos tendem a ser mais recorrentes e desastrosos (BERLINCK; BATISTA, 2020). Dessa forma, o mapeamento da severidade de queimadas atua como forma de identificar as áreas mais negativamente afetadas pelo fogo e que poderão ter dificuldade na regeneração florestal, podendo atrair novos incêndios futuros. Portanto, analisar a severidade de queimadas pode servir como uma ferramenta de gestão pública, na qual o mapeamento de áreas com maior gravidade de queimada necessitarão de maior atenção e monitoramento, o que poderá evitar futuros danos mais severos ao meio ambiente.

Não existem muitos estudos sobre severidade de queimadas do Bioma Amazônia, o que deixa uma lacuna a ser explorada dos reais impactos que os incêndios recorrentes causam na vegetação da região. Contudo, há uma dificuldade em analisar o bioma com imagens de satélite o ano todo devido à grande quantidade de nuvens que prejudicam a visualização da área, porém, o uso combinado de satélites com resoluções temporais e espaciais diferentes podem suprir esse problema. Há a necessidade de estudos que abordem essa temática no Bioma Amazônia, o qual tem interesse mundial quanto ao assunto queimadas e preservação da Amazônia.

## CONCLUSÃO

A utilização dos produtos MODIS fornecem bons dados para a identificação de incêndios ativos tendo em vista a alta resolução temporal capaz de capturar mais rapidamente os sinais de fogo, contudo, sua baixa resolução temporal não produz bons resultados de detecção de cicatrizes de queimadas, pois omitem áreas queimadas pequenas. Para esses fragmentos de queimadas os satélites mais indicados são os Landsat 8 e o Sentinel 2, os quais possuem resoluções espaciais melhores. O Sentinel 2 se destaca por apresentar resolução temporal maior que o Landsat 8, o que para detecção de queimadas e sua gravidade pode ser determinante, pois o tempo passado após o incêndio pode influenciar nos resultados. Os índices NBR, dNBR e RdNBR determinadas funções importantes dentro das análises de queimadas. Contudo o Índice espectral RdNBR é o que melhor identifica o grau de severidade de queimadas, mesmo em vegetações com características diferentes.

É necessário que ocorram mais pesquisas da gravidade das queimadas no bioma Amazônia com o uso de sensores de maiores resoluções espaciais e espectrais como Landsat 8 e Sentinel 2, tendo em vista que são poucos os trabalhos que utilizam as ferramentas de sensoriamento remoto no Brasil nessa temática e é um assunto amplamente estudado em outros países. O avanço de pesquisas do uso do sensoriamento remoto para o monitoramento e dimensionamento das queimadas, e o mapeamento da severidade da queimada é de alta prioridade para dar suporte à decisões da gestão do poder pública no curto prazo pós-incêndio.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. *et al.* Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. **Ecological Applications**, v. 25, p. 1493-1505, 2015.
- ALLEN, J. L.; SORBEL, B. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. **International Journal of Wildland Fire**, v. 17, n. 4, p. 463-475, 2008.
- ASTOLA, H.; HÄME, T.; SIRRO, L.; MOLINIER, M.; KILPI, J. Comparison of

- Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. **Remote Sensing of Environment**, v. 223, p. 257-273, 2019.
- BAR, S. *et al.* Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 100324, 2020.
- BASTARRIKA, A. *et al.* BAMS: a tool for supervised burned area mapping using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 6, n. 12, p. 12360-12380, 2014.
- BERLINCK, C. N., BATISTA, E. K. L. Good fire, bad fire: It depends on who burns. **Flora**, v. 268, p. 151610, 2020
- BOSCHETTI, L. *et al.* MODIS–Landsat fusion for large area 30 m burned area mapping. **Remote Sensing**, v. 161, p. 27-42, 2015.
- CARDIL, A. *et al.* Fire and burn severity assessment: calibration of relative differenced normalized burn ratio (RdNBR) with field data. **Journal of Environmental Management**, v. 235, p. 342-349, 2019.
- CHANG, L., PENG-SEN, S., SHI-RONG, L. A review of plant spectral reflectance response to water physiological changes. **Chinese Journal of Plant Ecology**, v. 40, n. 1, p. 80–91, 2016.
- CHUVIECO, E.; MART, 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. *et al.* Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 3, p. 322-331, 2004.
- CHUVIECO, E. *et al.* Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250m reflectance bands and thermal anomalies. **Earth Syst. Sci. Data Discuss**, v. 512, p. 1-24, 2018.
- CHUVIECO, E. *et al.* Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 45-64, 2019.
- DALDEGAN, G. A.; ROBERTS, D. A.; RIBEIRO, F. de F. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone. **Remote Sensing of Environment**, v. 232, p. 111340, 2019.
- ESA. **Sentinel-2 MSI Introduction**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>. Acesso em: 05 set. 2020.
- FARIAS, B. L. de *et al.* Current and future patterns of fire-induced forest degradation in Amazonia. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 9, p. 095005, 2017.
- FRANKLIN, S. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. 1 ed. **CRC Press**, 2001.
- GARCÍA-LLAMAS, P. *et al.* Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 80, p. 137-144, 2019.
- GIGLIO, L. *et al.* An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 408-420, 2009.
- GIGLIO, L. *et al.* The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 178, p. 31-41, 2016.
- GIGLIO, L. *et al.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product.

- Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72-85, 2018.
- HAWBAKER, T. J. *et al.* Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 198, p. 504-522, 2017.
- HUANG, H. *et al.* Separability analysis of sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 873-890, 2016.
- INPE. Metodologia Utilizada nos Projetos PRODES e DETER. **Coordenação Geral de Observação da Terra. Programa de Monitoramento da Amazônia e Demais Biomas**, 2019.
- KASISCHKE, E.; FRENCH, N. H. Locating and estimating the areal extent of wildfires in Alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR NDVI composite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 263-275, 1999.
- KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, p. 116-126, 2009.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. **Landscape assessment: sampling and analysis methods**. USDA Forest Service, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, 2006.
- LEAL, F. A. *et al.* Utilização do NDVI na análise da vegetação após ocorrência de incêndio. **Nativa, Sinop: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 226-231, mar./abr. 2019.
- LI, P.; JIANG, L.; FENG, Z. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. **Remote Sensing**, v. 6, p. 310-329, 2014.
- LIMA, A. *et al.* Severidade dos incêndios florestais em anos de seca extrema. *In*: BORMA, L. de S.; NOBRE, C. A. (org.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 13, p. 180-206.
- LIU, J. *et al.* Burned area detection based on Landsat time series in savannas of southern Burkina Faso. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 210-220, 2018.
- LIZUNDIA-LOIOLA, J. *et al.* A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111493, jan. 2020.
- LOBATO, R. *et al.* Índice de Vegetação por diferença normalizada para análise da redução da Mata Atlântica na região costeira do Distrito de Tamoios, Cabo Frio/RJ. **Caderno de Estudos Geoambientais-CADEGEO**, Niterói, v. 1, n. 1, p.14-22, 2010.
- MARTINS, L. N., BAPTISTA, G. M. M. Análise Multitemporal de Sequestro Florestal de Carbono no Projeto Assentamento Carrão, Acre. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6. p. 1648-1657, 2013.
- MANCINO, G. *et al.* Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 291-311, 2020.
- MILLER, J. D.; THODE, A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). **Remote Sensing of Environment**. v. 109, n. 1, p. 66-80, 2007.
- MILLER, J. D. *et al.* Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 645-656, 2009.
- MISHRA, N. *et al.* Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). **Remote Sensing**, v. 6,

p. 12619–12638, 2014.

MONTEIRO, T. R. R. **Uso dos solos, índices de vegetação e degradação na APA das OnçasPB**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

MORGAN, P. *et al.* Challenges of assessing fire and burn severity using field measures, remote sensing and modelling. **International Journal of Wildland Fire**, v. 23, p. 1045, 2014.

MORTON, Y *et al.* Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 368, n. 1619, p. 20120163, 2013.

NASA. MODIS. **Specifications**. 2020. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>. Acesso em: 08 set. 2020.

NASA. **Landsat Science**. 2020. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>. Acesso em: 10 set. 2020.

NEPSTAD, D. *et al.* Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10, p. 704-717, 2004.

NEPSTAD, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**. v. 344, p. 1118-1123, 2014.

PAUSAS, J. G.; BRADSTOCK, R. A. Fire persistence traits of plants along a productivity and disturbance gradient in mediterranean shrublands of south-east Australia **Global Ecology and Biogeography**. v. 16, p. 330-340, 2007.

PENHA, T. V. **Deteção de áreas queimadas na Amazônia utilizando imagens de média resolução espacial, técnicas de GEOBIA e mineração de dados**. 2018. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

PEREIRA, a. A. *et al.* Avaliação de nove índices espectrais quanto a separabilidade entre queimadas e diferentes alvos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, 17., 2015, João Pessoa-PB, Brasil. **Anais [...]**. João Pessoa-PB, 2015.

PEREIRA, A. A. *et al.* Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In: CHUVIECO, E. (ed.). **Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin**. Berlin: Springer-Verlag, 1999. p. 123-138.

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 Deteção de Áreas Queimadas em Vegetação Campestre de Cerrado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 1131-1143, 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 144 p.

QUINTANO, C. *et al.* Burn severity mapping from Landsat MESMA fraction images and land surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 83-95, 2017.

ROGERS, B. M. *et al.* Quantifying fire-wide carbon emissions in interior Alaska using field measurements and Landsat imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 119, p. 1608-1629, 2014.

ROTETA, E. *et al.* Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 222, p. 1-17, 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H., SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3., 1973, Washington.

- Proceeding [...]**. Washington: NASA, United States, 1973. p. 309-317.
- ROY, D. P. *et al.* Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 137-162, 2005.
- 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, n. 1, p. 112–116, 2006.
- ROY, D. P. *et al.* Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping: a combined sensor multi-temporal change detection approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 231, p. 111254, 2019.
- SCHROEDER, W. *et al.* The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 143, p. 85-96, 2014.
- SCHROEDER, W. *et al.* Active fire detection using Landsat-8/OLI data. **Remote Sensing of Environment**. v. 185, p. 210-220, 2016.
- SILJESTROM RIBED, P.; MORENO LOPEZ, A. Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 9, p. 1577-1587, 1995.
- SILVA, S. L.; BAPTISTA, G. M. M. Análise do Grau de Severidade de Áreas Queimadas na Estação Ecológica de Águas Emendadas por Meio de Dados do Landsat 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 2, p. 431-438, 2015.
- TEILLET, P. M. *et al.* Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. **Sensing of Environment**. v. 110, p. 393–409, 2007.
- TEIXEIRA, A. L. S. **Correlação entre índices espectrais de verdor, umidade e senescência e ocorrências de queimadas no Parque Nacional de Brasília**. 2020. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- TEOBALDO, D. **Sequestro florestal de carbono e avaliação de resiliência: o caso do incêndio no Parque Nacional de Brasília em 2010**. 2013. Monografia. Instituto de geociências, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013.
- TRIGG, S.; FLASSE, S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. **J. Remote Sens.**, v. 21, p. 3161-3168, 2000.
- TURETSKY, M. R. *et al.* Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peatlands. **Nature Geoscience**, v. 4, p. 27-31, 2011.
- VERAVERBEKE, S. *et al.* The temporal dimension of differenced normalized burn ratio (dNBR) fire/burn severity studies: the case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2548-2563, 2010.
- VERAVERBEKE, S. *et al.* Hyperspectral remote sensing of fire: State-of-the-art and future perspectives. **Remote Sensing of Environment**, v. 216, p. 105-121, 2018.
- XU, D.; GUO, X. Compare NDVI Extracted from Landsat 8 Imagery with that from Landsat 7 Imagery. **Am. J. Remote Sensing**, v. 2, p. 10–14, 2014
- XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and application. **Journal of Sensors**. v. 1, p. 1-17, 2017.