



**EFEITOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA VEGETAÇÃO DO
CERRADO UTILIZANDO DADOS DO SENSOR MODIS**

GUSTAVO CHAVES MACHADO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

EFEITOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA VEGETAÇÃO DO CERRADO
UTILIZANDO DADOS DO SENSOR MODIS

GUSTAVO CHAVES MACHADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Eraldo A. T. Matricardi (Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza (Departamento de Engenharia Florestal – UnB)
(Examinador interno)

Dra. Renata Dias Françoso (Pesquisadora colaboradora do programa de Pós-graduação em Ecologia - UnB)
(Examinadora externa)

Brasília, 21 de maio de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA
VEGETAÇÃO DO CERRADO UTILIZANDO DADOS DO
SENSOR MODIS**

GUSTAVO CHAVES MACHADO

ORIENTADOR: ERAALDO A. T. MATRICARDI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL. DM – 252/2015
BRASÍLIA/DF: MAIO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

MACHADO, GUSTAVO CHAVES

Efeitos dos incêndios florestais na vegetação do cerrado utilizando dados do sensor MODIS. 2015.
xvi, 53p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de
Brasília. Faculdade de Tecnologia).

Departamento de Engenharia Florestal

1. Incêndios florestais

2. Geoprocessamento

3. Imagens Landsat

4. Índice de vegetação

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

MACHADO, G. C. (2015). Efeitos dos incêndios florestais na vegetação do cerrado utilizando dados do sensor MODIS. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação PPGEFL.DM- /2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 53 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Chaves Machado.

TÍTULO: Efeitos dos incêndios florestais na vegetação do cerrado utilizando dados do sensor MODIS.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Gustavo Chaves Machado
Campus Universitário Darcy Ribeiro.
70.910-900 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Associação dos Engenheiros Florestais do Distrito Federal-AEFDF, fonte de inspiração na superação dos obstáculos e minha determinação.

Ao DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL-EFL da Universidade de Brasília - UNB pela oportunidade que me foi dada de encarar mais uma empreitada científica e obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Ao Dr. Eraldo A. T. Matricardi pela orientação do trabalho e conhecimento compartilhado.

Ao Dr. Álvaro Nogueira pelo apoio e pela confiança.

A Dr.^a Renata D. Françoso pelo despertar de ideias e estímulo ao desenvolvimento da pesquisa.

À Associação dos Engenheiros Florestais do
Distrito Federal-AEFDF, fonte de inspiração na
superação dos obstáculos e minha determinação.

RESUMO

EFEITOS DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS NA VEGETAÇÃO DO CERRADO UTILIZANDO DADOS DO SENSOR MODIS

Autor: Gustavo Chaves Machado

Orientador: Dr. Eraldo A. T. Matricardi

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, 2015.

O Cerrado é o bioma brasileiro não-Amazônico que perdeu sua vegetação natural de forma mais acelerada nas últimas décadas, muito afetadas também pelos incêndios florestais. Os incêndios florestais são considerados um grande problema ambiental para a vegetação do Cerrado. Vários estudos indicam o aumento da frequência e abrangência de tais incêndios, o que os tornam ainda mais severos e danosos ao meio ambiente. Os dados de sensoriamento remoto podem contribuir com a detecção e a quantificação dos impactos do fogo na vegetação do Cerrado. O presente estudo utilizou o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) derivado de dados temporais adquiridos pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) para estudo dos efeitos dos incêndios florestais na vegetação do Bioma Cerrado, no período de fevereiro de 2001 a dezembro de 2013. Esta pesquisa enfocou a análise dos efeitos dos incêndios florestais nos remanescentes de vegetação do bioma. Para a caracterização dos tipos de vegetação, foi utilizado o mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) em escala 1:250.000. Foi utilizado um total de 302 imagens EVI livres de nuvens, resolução espacial de 250 metros, adquiridas da Administração Nacional Aeronáutica e Espacial Norte-americana (NASA). Os resultados do presente estudo indicam que os dados EVI são sensíveis aos diferentes tipos de vegetação e que a disponibilidade de água exerce um controle de primeira ordem sobre a sazonalidade da vegetação afeta pelos incêndios. Para a média de todo o bioma os valores de EVI 48 dias pós incêndios florestais apresentaram-se 8,4 % maiores que os valores na véspera dos incêndios, em algumas tipologias de vegetação como Savana Estépica Parque, os valores apresentam-se 34% superiores a véspera. Já em outras tipologias como Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas os valores se apresentam 28% menores. Observando isoladamente o acúmulo anual de incêndios verificou-se que valores médios de EVI nas amostras oscilam positiva e negativamente em no máximo 2% independente da quantidade de anos acumulados. Da estação seca para a chuvosa foi observado um incremento de 33% nos valores de EVI, o efeito dos incêndios na estação seca resultou em uma variação negativa significativa de 2% no EVI. Já para a estação chuvosa a variação entre amostras com e sem incêndios não é significativa e é menor que 1%. Em relação a recuperação do vigor da vegetação, na média geral para os eventos de incêndios ocorridos no início da estação seca, a recuperação aos valores iniciais de EVI é superior a 180 dias (6meses). No entanto para eventos ocorrido no fim da estação seca (setembro/outubro), foi observado que 16 dias após o vigor da vegetação já era 5% superior ao estado inicial, 48 dias depois já ultrapassava os 21 % dos valores de EVI na véspera de ocorrência dos incêndios.

Palavras-chave: Propriedades espectrais da vegetação; Índice de Vegetação Melhorado (EVI); Bioma Cerrado; Incêndios Florestais.

ABSTRACT

FOREST FIRE EFFECTS IN THE CERRADO VEGETATION USING MODIS SENSOR DATASET

Author: Gustavo Chaves Machado

Adviser: Dr. Eraldo A. T. Matricardi

Master Degree Program in Forests Sciences

Brasília, 2015.

The Cerrado is the non-Amazonian biome that has lost its natural vegetation more rapidly in recent decades, much also affected by forest fires. Forest fires are considered a major environmental problem for the vegetation of the Cerrado. Several studies indicate an increase in the frequency and extent of such fires, which make them even more severe and damaging to the environment. The remote sensing data can contribute to the detection and quantification of fire impacts in the Cerrado vegetation. This study used the Enhanced Vegetation Index (EVI) derived from temporal data acquired by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer sensor (MODIS) to study the effects of forest fires in the Cerrado vegetation, from February 2001 to December 2013. . This research focused on the analysis of the effects of forest fires in the biome vegetation remnants. For the characterization of the types of vegetation, it used the mapping of the Cerrado Vegetation Cover prepared by the Ministry of Environment (MMA) in 1: 250,000 scale. We used a total of 302 cloud-free images EVI, spatial resolution of 250 meters, acquired the National Aeronautics and Space Administration North American (NASA). The results of this study indicate that EVI data are sensitive to different types of vegetation and water availability has a first-order control on the seasonality of vegetation affects the fires. For the average of the entire biome values of EVI 48 days after forest fires showed up 8.4% higher than the values on the eve of fires in some vegetation types as Savannah Steppe Park, the values are presented 34% higher the day before. Already in other types as Forest Semideciduous of Lowlands values present 28% lower. Observing alone the annual buildup of fire was found that average values of the samples EVI positively and negatively oscillating at a maximum of 2% independent of the amount of accumulated years. The dry season to the rainy noted an increase of 33% in the EVI values, the effect of fires in the dry season resulted in a significant negative variation of 2% in the EVI. As for the rainy season variation between samples with and without fire is not significant and is less than 1%. Regarding the recovery of the force of vegetation, the overall average for the fire events at the beginning of the dry season, the recovery to the initial values of EVI is higher than 180 days (6months). However event occurred at the end of the dry season (September / October), it was observed that 16 days after the force of vegetation was already 5% higher than the initial state, after 48 days already exceeded 21% of EVI values on the eve of occurrence of fires.

Keywords: spectral properties of vegetation; Enhanced Vegetation Index (EVI); Cerrado; Forest Fires.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. QUESTÕES DE PESQUISA	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. INCÊNDIOS FLORESTAIS	3
2.1.1 FATORES QUE AFETAM OS INCÊNDIOS FLORESTAIS	5
2.1.2 SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA DE DETECÇÃO E MONITORAMENTO DE INCÊNDIOS E QUEIMADAS	8
2.1.3 O SENSOR MODIS.....	10
2.1.4 PRODUTOS MODIS.....	11
2.1.5 DETECÇÃO DE FOCOS DE INCÊNDIOS (MOD14)	12
2.1.6 DETECÇÕES DE ÁREAS QUEIMADAS (MCD45A1).....	14
2.1.7 O ALGORITMO MCD45A1	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
3.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE VEGETAÇÃO E MODIS INDICE DE VEGETAÇÃO E QUEIMADAS	19
3.3. AMOSTRAGEM UTILIZADA.....	21
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	22
3.5. AVALIAÇÕES DE ACURÁCIA DA RESPOSTA DO PRODUTO DE EVI MOD13Q1.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. VALIDAÇÃO DO PRODUTO MOD13Q1	27
4.2. COESÃO ENTRE A RESPOSTA DO LANDSAT8 E MODIS	31
4.3. RESPOSTA DO EVI MOD13Q1 APÓS OS INCÊNDIOS FLORESTAIS NO BIOMA CERRADO PARA A SERIE TEMPORAL 2001-2013	34
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características gerais das bandas 1 a 36 do sensor MODIS.....	12
Tabela 2 - Matriz de correlação de focos de calor detectados pelo EOSDIS em 2014 e EVI derivado de imagem LANDSAT 8 cena 221/70 e imagens MODIS produto MOD13Q1.....	28
Tabela 3 - Características gerais das médias de EVI para as tipologias de vegetação.....	35
Tabela 4 - resultado do Teste de igualdade de mediana das médias de EVI (2001/2013) para o período de seca para as amostras individuais com e sem incêndios.	36
Tabela 5 - resultado do Teste de igualdade de mediana das médias de EVI (2001/2013) para o período de seca para as amostras individuais com e sem incêndios.	36
Tabela 6 - resultados da correlação de Pearson para as amostras individuais com queimada das médias de EVI (2001/2013).	37
Tabela 7 - Resultado do Teste t para as amostras individuais das médias de EVI (2001/2013) e Diferença entre amostras.	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A) remanescentes de vegetação natural incidente no bioma Cerrado. B) exemplo da distribuição amostras aleatórias em quadriculas sistemáticas de 5x5 km.	20
Figura 2 - Pontos de focos de calor de 2014 gerados pelo EOSDIS sobre a imagem do EVI derivado da cena 221/070 do LANDSAT 8 OLI.....	25
Figura 3 –Modelo de interpolação bilinear utilizado na extração dos valores de EVI do LANDSAT 8 OLI.	26
Figura 4 – diagrama de dispersão dos valores de EVI (Landsat 8 x MOD13Q1)e dos pontos de focos de calor de 2014 do FIRMS-EOSDIS	29
Figura 5 - Diagrama de dispersão dos valores de EVI dos pontos de focos de calor de 2014 detectados para as variáveis de datas próximas das imagens LANDSAT 8 OLI cena de orbita ponto 221/70 (EVI) e Conjunto de gráficos demonstrando os efeitos dos resíduos obtidos pela aplicação da equação do modelo linear de regressão (<i>media Landsat = -0,01388 + 1,0103 media Modis</i>).....	30
Figura 6 – (a) imagem de 1 setembro 2014 LANDSAT EVI com resolução de 30 metros. (b) imagem MODIS composta de 16 dias (28 de agosto a 13 de setembro)..	31
Figura 7 – Imagem de 1 setembro de 2014 LANDSAT8 EVI mostra os focos de calor gerados pelo EOSDIS do dia e indicando que as áreas mais avermelhadas possuem menor EVI e as azuladas maiores EVI.....	32
Figura 8 – Resposta das médias de EVI dos sensores LANDSAT8 e MODIS exclusivamente para os focos de calor do dia 1 de setembro de 2014.	33
Figura 9 – Resposta das médias de EVI dos sensores LANDSAT8 e MODIS exclusivamente para os focos de calor para períodos e estações distintas.	33
Figura 10 – Dendrograma do processo de agrupamento hierárquico por distância euclidiana dos valores médios de EVI para as variáveis mensais.....	34
Figura 11 – Valores médios de EVI, antes e após de 48,32,16 dias da véspera da queimada, onde a véspera é o indicativo de contagem para referência do mês.	38
Figura 12 –Variação sazonal da média das amostras com incêndios florestais para o intervalo da véspera e de 48,32,16 dias antes e após a queima.....	39
Figura 13 - Média geral de 2001 a 2013 das amostras com incêndios florestais para o intervalo da véspera e de 48,32,16 dias antes e após a queima.....	40
Figura 14 - dados mensais da precipitação, EVI e média de EVI na véspera da queimada nos remanescentes de vegetação natural incidente no bioma Cerrado.	40
Figura 15 - valores médios anuais de EVI das amostras com queimada para o período antes e pós fogo.....	41
Figura 16 - variação relativa de EVI para série 2001-2013.	43

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A comunidade científica internacional percebeu o fato e começou a chamar a atenção para o desmatamento brasileiro fora da Amazônia, particularmente àquele situado no bioma Cerrado (RATTER et al., 1997; EVA et al., 2004; SILVA et al., 2006). O Governo brasileiro, reconhecendo tal limitação, lançou em 2007 os resultados do Projeto de Mapeamento da Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros, um dos componentes do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade – Probio com o intuito de preencher momentaneamente esta lacuna (SANO et al., 2008; 2009). Os resultados do Probio colocaram o bioma Cerrado em evidência ao demonstrar que até o ano de 2002, 43.22% do bioma apresentava vegetação antropizada.

O bioma Cerrado é constituído por formações savânicas e além de ocupar a maior parte da região central do Brasil, estende-se desde a porção norte da região sul, no estado do Paraná, até o norte do estado do Maranhão na região nordeste. Trata-se do segundo maior bioma brasileiro, cobrindo uma superfície superior a 2000000 km² (IBGE, 2004). O cerrado detém elevada variabilidade espacial de fitofisionomias (FURLEY, 1999; OLIVEIRA-FILHO & RATTES, 2002). Suas tipologias variam desde vegetações campestres com predominância de gramíneas até as matas de galeria, formadas por três estratos arbóreos distintos com complexidade estrutural similar as florestas da Amazônia e Mata Atlântica, sendo reconhecido como um importante hotspot de biodiversidade (MYERS et al., 2000; SILVA et al., 2002). A alta diversidade de ambientes e a heterogeneidade nos atributos ambientais do Cerrado (DE CASTRO & KAUFFMAN, 1998; BUTTLER et al., 2012) favorecem a riqueza florística, diversidade biológica e endemismo (BRIDGEWATER et al., 2004; SIMON et al., 2009). Por outro lado, o Cerrado apresenta características edafoclimáticas e relevo que favorecem a mecanização para as atividades agropecuárias, proporcionando alta produtividade potencial. Por esta razão, vem sendo extensivamente utilizado para a produção de alimentos (RADA, 2013). Portanto, o corrente cenário é o de expansão da

fronteira agrícola e aumento do desmatamento (SANO et al., 2001; JEPSON et al., 2010; PHILIPPI et al., 2009; SANO et al., 2011), causando alterações ecossistêmicas e nos ciclos biogeoquímicos (BERNOUX et al., 2006; BATTLE-BAYER et al., 2004).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora para a discriminação de fitofisionomias do Cerrado e avaliação da dinâmica sazonal destes ecossistemas (RATANA et al., 2005; HILL et al., 2011). Estudos recentes vêm demonstrando também a possibilidade da separação de áreas agrícolas de campos naturais a partir da variação intra-anual da resposta espectral (GALFORD et al., 2008; BROWN et al., 2013).

A vegetação do Cerrado enfrenta flutuações sazonais acentuadas na precipitação pluviométrica ao longo do ano (EITEN, 1972). Há grande produção de biomassa durante a estação chuvosa e na estação seca, as gramíneas, em sua maioria, estão inativas e a maior parte de sua biomassa aérea seca morre, o que torna a vegetação altamente suscetível a incêndios Florestais.

Incêndios têm ocorrido no Cerrado com frequência durante vários anos e não chegam a destruir a vegetação. Muitas espécies apresentam estratégias ecológicas que resistem à passagem do fogo (COUTINHO, 1980; MEDEIROS e MIRANDA, 2005; GOTTSBERGER e SILBERBAUER-GOTTSBERGER, 2006). No entanto, o aumento da frequência dos incêndios florestais tem refletido negativamente na estrutura e composição florística (MIRANDA et al., 2002).

O presente estudo tem como objetivo caracterizar os efeitos dos incêndios florestais nos diferentes tipos de vegetação do Bioma Cerrado utilizando o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) derivado de dados do Sensor MODIS.

1.2. OBJETIVOS

Estimar os efeitos dos incêndios florestais na vegetação do Bioma Cerrado a partir de dados de sensores remotos.

Como objetivos específicos citam-se:

- a) Analisar a tendência geral da resposta da vegetação antes e após os incêndios florestais no Cerrado;
- b) Caracterizar a heterogeneidade temporal das mudanças no índice de vegetação EVI na vegetação natural do bioma Cerrado;
- c) Averiguar a potencialidade do uso do produto MOD13Q1 no bioma Cerrado para detecção da resposta do vigor da vegetação aos incêndios florestais.

1.3. QUESTÕES DE PESQUISA

As questões de pesquisa mais relevantes para proporcionar um melhor entendimento dos efeitos dos incêndios florestais sobre vegetação do Cerrado incluem:

1. Quais as variações anuais dos efeitos dos incêndios florestais na vegetação do Cerrado?
2. Quais as variações dos efeitos dos incêndios florestais para cada tipo ou formação vegetal do Cerrado? Quais as respostas da vegetação diante das diferentes frequências do fogo?
3. É possível utilizar um sensor de resolução moderada para qualificar a nível local e regional as respostas do vigor da vegetação?

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. INCÊNDIOS FLORESTAIS

Muitos biomas convivem com o fogo e dependem dele para que determinadas espécies possam se regenerar e propagar, como por exemplo algumas espécies do Cerrado brasileiro (NUNES, 2005). De acordo com SALGADO-LABOURIAU e FERRAZ-VICENTINI (1994), os incêndios ocorrem no Cerrado há mais de 32.000 anos AP (antes do presente). Por mais de 10.000 anos os incêndios naturais e os antrópicos ocorrem na região (MIRANDA et al., 2010).

Atualmente, observa-se um aumento da incidência de grandes incêndios, ocorrendo em quase todos os continentes e ecossistemas, independente da capacidade de combate e gestão dos países atingidos. Por exemplo, durante 1997 e 1998, mais de 20 milhões de hectares foram queimados na América Latina, causando um gasto estimado de US\$ 10 a 15 bilhões (BOWMAN et al., 2009).

De forma geral, o fogo é considerado um processo ecológico que causa influências na estrutura dos ecossistemas, na composição e na ciclagem de nutrientes (KAUFFMAN et al., 1994), gerando impactos locais e regionais no uso do solo, produtividade, capacidade de carga, biodiversidade e impactos mais globais sobre os ciclos hidrológicos, biogeoquímicos e processos atmosféricos (ROY et al., 2002; CHOCRANE 2001).

A queima de biomassa contribui significativamente na injeção de gases e partículas poluentes, os quais afetam as propriedades químicas da atmosfera e troposfera, com impacto direto sobre o balanço radioativo da superfície, propriedades das nuvens e na qualidade do ar (GRÉGOIRE et al., 2003; KAUFMAN et al., 2003; GRÉGOIRE et al., 2013). Do total de gases de origem antrópica liberados na atmosfera, 40% (dióxido de carbono), 16% (metano) e 43% (monóxido de carbono) são oriundos de queima de biomassa (HOUGHTON et al., 1995). Segundo ANDRAE (1991), na América do Sul a queima de biomassa é responsável pela emissão de 30 Tg por ano de partículas aerossóis na atmosfera.

Além dos efeitos na atmosfera, as queimadas causam sérios impactos sobre a vegetação. O fogo tem ocorrido nos ecossistemas por centenas de milhões de anos, ajudando a moldar a distribuição global dos biomas e influenciando a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas (BOND et al., 2005). Os impactos do fogo sobre a vegetação vão depender do tipo do regime de queima, do comportamento do fogo (MIRANDA et al., 2010), do ciclo de vida das espécies vegetais atingidas, da mortalidade de adultos, da quantidade de germinação após o fogo, do estabelecimento e da subsequente sobrevivência das plântulas após o fogo (WHELAN, 1995). Por exemplo, o regime do fogo no bioma Cerrado tem sofrido alterações, com queimadas

ocorrendo no período seco e em curto intervalo de tempo, o que resulta em fisionomias mais abertas, em consequência das altas taxas de mortalidade, alterações nas taxas de recrutamento e consequente no favorecimento da vegetação rasteira (MIRANDA e SATO, 2005).

O calor gerado pelo fogo causa efeitos sobre o solo: promovendo o aumento da erosão, devido a maior exposição da superfície do solo através do consumo da cobertura vegetal, principalmente em terrenos acidentados; consumo total ou parcial da matéria orgânica; e mudanças das características físicas e químicas do solo (SOARES; BATISTA, 2007). A temperatura do solo pode sofrer influência direta ou indireta dos incêndios. Os efeitos diretos são observados durante a passagem do fogo, alterando as temperaturas máximas do solo. Os efeitos indiretos são gerados pela alteração da cobertura vegetal, são mais persistentes e podem gerar maiores impactos que os efeitos diretos, pois a redução da cobertura vegetal, resultante do consumo de combustível e da deposição da camada de cinzas na superfície do solo, resulta em alterações no regime térmico do solo (MIRANDA et al., 2010).

O fogo é um distúrbio que também provoca impactos sobre a fauna, afetando a riqueza das comunidades ecológicas por meio dos efeitos diretos e/ou indiretos. Os efeitos diretos são mortes, queimaduras e intoxicação, podem ser facilmente mensurados pela simples contagem dos indivíduos mortos após a passagem do fogo ou através de um censo das populações antes e após a queimada. Os efeitos indiretos ocorrem após o fogo, onde a intensidade dos efeitos vão depender de uma série de fatores, que acarretam mudanças na estrutura das comunidades animais, devido às mudanças na paisagem (FRIZZO et al., 2011).

2.1.1 FATORES QUE AFETAM OS INCÊNDIOS FLORESTAIS

Em escalas mais amplas, os incêndios respondem às variações do tipo de combustível, estrutura da vegetação, características topográficas e as condições climáticas da região (BOWMAN et al., 2009).

Pode-se dizer que a probabilidade do fogo ocorrer e se propagar é função da probabilidade de haver uma fonte de ignição e da probabilidade de haver condições propícias para a propagação do fogo (SOARES; BATISTA, 2007). Segundo BATISTA (2000), a ocorrência e propagação dos incêndios florestais em dada região é função de vários fatores associados, que, por sua vez, variam em função do ambiente, ou seja, a diversificação da ocorrência e a propagação dos incêndios são influenciados pelas características do ambiente.

De acordo com SOARES e BATISTA (2007), a partir da análise de dois grupos de fatores, fonte de ignição e condições de propagação, é possível avaliar o potencial onde e como o fogo vai se propagar. O primeiro fator, está relacionado as atividades que geram a faísca ou chama que iniciará o processo de combustão. No Brasil e outros países, as estatísticas sobre as ocorrências de incêndios florestais mostram que a grande maioria dos incêndios iniciam a partir de fontes relacionadas direta ou indiretamente às atividades humanas. Já o segundo fator, diz respeito a todos os fatores do ambiente que influenciam direta ou indiretamente o desenvolvimento do fogo em uma região.

Segundo SOARES e BATISTA (2007):

- Material combustível – Qualquer material orgânico, vivo ou morto, acima do solo, capaz de entrar em combustão. A quantidade de material combustível determinará se o fogo vai ou não se propagar, além de definir a intensidade de calor liberada. Outras características do material combustível também influenciam o comportamento do fogo: arranjo, continuidade, umidade, compactação e distribuição vertical.
- Condições climáticas – incluem vários elementos meteorológicos importantes na propagação dos incêndios, tais como: umidade relativa, vento, precipitação e temperatura, influenciam fortemente a ignição e a propagação dos incêndios. As condições climáticas de uma região determinam algumas características do material combustível, como por exemplo a umidade que é reflexo do clima e das condições atmosféricas e pode variar rapidamente.

- Topografia – influencia fortemente o clima e determina o tipo de combustível em determinado área, assim, a topografia influi decisivamente no comportamento do fogo. Os principais fatores topográficos que exercem influência são: elevação ou altitude, topos de montanhas e fundos de vales apresentam condições diferenciadas de queima durante um mesmo período de tempo; exposição, também chamado de azimute de orientação das encostas, é a direção do lado da montanha em relação aos pontos cardeais, apresenta efeito direto na possibilidade de ocorrência e propagação de um incêndio, uma vez que a diferença na quantidade de calor recebida pelas diversas exposições provoca uma série de reações que originam efeitos diversos no potencial de risco; declividade, à medida que o grau de inclinação aumenta a velocidade de propagação também aumenta, pois o fogo seca e aquece o material combustível localizado na parte superior do aclive com maior intensidade, uma vez que esse material fica mais exposto às ondas de calor, transmitidas tanto por radiação como por convecção.

- Tipo de cobertura vegetal – as propriedades dos combustíveis variam em função do tipo de cobertura vegetal que, por sua vez, influenciam o comportamento do fogo. Por exemplo, uma floresta aberta permite maior penetração dos raios solares e do vento, proporcionando aumento da temperatura do combustível e da taxa de evaporação, conseqüentemente, o potencial de propagação do fogo é maior. Já em florestas densas e fechadas ocorre maior interceptação da radiação solar, o que reduz a temperatura do ar e do material combustível, ou seja, a vegetação funciona como uma barreira, evitando a livre passagem de correntes de ar, o que reduz a velocidade do vento em seu interior. Além disso, a maior taxa de transpiração do material florestal proporciona um aumento da umidade relativa do ar. Assim, todos esses fatores reunidos reduzem o risco de ignição e propagação de incêndios em florestas densas.

Vários estudos têm empregado os fatores supracitados para estabelecer zoneamento de risco de incêndios florestais. Entretanto, outras variáveis espaciais também têm sido utilizadas, como as estradas, declividade, exposição das encostas e outras (FERRAZ e VETTORAZZI, 1998).

Segundo NUNES (2005), de forma geral, o risco a ocorrência de um incêndio está relacionado a agentes que originam o fogo, enquanto o perigo aos incêndios relaciona-se com as causas que aumentam ou diminuem a probabilidade de sua ocorrência. O autor ressalta a importância de se explorar os vários fatores determinantes do risco e do perigo de incêndios florestais e a utilização dos índices de perigo de incêndio, de tal forma que possibilitem o melhor planejamento das atividades de prevenção, definição de regime de queima, a permissão para queimadas controladas em períodos menos perigosos, a previsão do comportamento do fogo visando a adoção de técnicas mais eficazes e advertência pública do grau de perigo.

2.1.2 SENSORIAMENTO REMOTO COMO FERRAMENTA DE DETECÇÃO E MONITORAMENTO DE INCÊNDIOS E QUEIMADAS

O sensoriamento remoto é uma ferramenta ou técnica que faz uso de sensores para medir a quantidade de energia eletromagnética emanada de um objeto ou área geográfica à distância (JENSEN, 2011). Desta forma, os dados de sensoriamento remoto fornecem um meio prático e único para o monitoramento de queimadas, que por sua vez, trazem contribuições importantes para os estudos de mudanças climáticas, tais como: efeito estufa, chuva ácida, balanço de energia, formação de nuvens e precipitação (ROY et al., 2002).

Além do mais, a estimativa de áreas queimadas em escala global e regional é necessária para quantificar os efeitos do fogo na vegetação (MATRICARDI et al., 2010; MIETTINEN, 2007). KAUFMAN et al. (1990) reforçam a importância de se obter informações diretas sobre os incêndios a partir das imagens de satélite, pois, mesmo que as imagens de satélite não possam ser usadas diretamente para detectar a emissão de gases-traço, pode-se estimar esses valores devido a relação de proporcionalidade entre a quantidade de biomassa queimada e a quantidade de gases emitidos, tais como CO₂, que corresponde a aproximadamente 90% das emissões de gases liberados durante as queimadas.

Atualmente, as imagens de satélite são muito utilizadas para detectar focos de incêndios e áreas queimadas. A avaliação em larga escala da ocorrência desses eventos

tem sido realizada, principalmente, por ERS ATSR (Along Track Scanning Radiometer), NOAA AVHRR (National Oceanic Atmospheric Administration), SPOT VEGETATION e TERRA/AGUA sensor MODIS, devido à alta resolução temporal e espacial (MIETTINEN, 2007). O sensor MODIS apresenta uma série de melhorias em relação aos sistemas do NOAA AVHRR e do GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), tais como resolução radiométrica, temporal e espectral (JUSTICE et al., 2002b).

Existem duas principais linhas de pesquisas relacionadas ao monitoramento e detecção de queimadas. A primeira linha está relacionada a detecção de focos de calor, ou seja o registro instantâneo apenas dos materiais com temperaturas de algumas centenas de graus centígrados, utilizando bandas espectrais do infravermelho termal (JUSTICE et al., 2002a; JUSTICE et al., 2002b; KAUFMAN et al., 1998; KAUFMAN et al., 2003; GIGLIO et al., 2003) e a segunda baseia-se na detecção da extensão das áreas queimadas, onde, geralmente, utilizam bandas espectrais da região do visível e infravermelho (ROY et al., 2002; ROY et al., 2005; ROY et al., 2008; ROY et al., 2009; GIGLIO et al., 2009; BOSCHETTI et al., 2010; GRÉGOIRE et al., 2013; ANDERSON et al., 2005; PIROMAL et al., 2008).

A detecção de focos de calor fornece informações sobre a distribuição espacial e temporal desses eventos, mas não a área realmente afetada pelas queimadas, que é uma variável importante para quantificar a magnitude da queima de biomassa em escala global, através de dados oriundos de sensores remotos (GRÉGOIRE et al., 2003).

Vários trabalhos têm buscado usar diferentes algoritmos na estimativa de áreas queimadas e focos de calor em diferentes escalas. As diferenças nos resultados são marcantes, superiores a duas ordens de magnitude quanto a superfície estimada, bem como nos períodos de ocorrência (SETZER et al., 2007).

No âmbito nacional, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), desde a década de 1980, vem aprimorando um sistema de detecção de queimadas a partir de sensores a bordo de satélites (GONTIJO et al., 2011). Como resultado deste esforço, o INPE mantém um portal online, o qual inclui o monitoramento operacional de focos de

queimada e de incêndios florestais detectados por satélites, bem como o cálculo e previsão do risco de fogo da vegetação. As informações são disponíveis cerca de 20 minutos após as passagens dos satélites (INPE, 2014).

2.1.3 O SENSOR MODIS

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) foi desenvolvido para promover o monitoramento da superfície terrestre, oceanos e atmosfera (JUSTICE et al., 1998). Este sensor foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999, primeiro satélite do “Earth Observing System” (EOS), um programa da NASA, e as coletas de dados iniciaram em fevereiro de 2000. Em maio de 2002, foi lançado um segundo satélite chamado de AGUA contendo o sensor MODIS (JUSTICE et al., 2002a).

Outros sensores além do MODIS estão a bordo destes satélites TERRA: CERES, ASTER, MISR e MOPITT (LATORRE et al., 2003). O MODIS foi projetado, principalmente, para gerar dados que melhoram nossa compreensão da dinâmica global e os processos que ocorrem na terra, nos oceanos e na atmosfera. Além de fornecer bases para o desenvolvimento e validação de modelos capazes de prever mudanças globais com precisão suficiente, que, desta forma, podem ajudar nas tomadas de decisões (MODIS Website, 2013).

Os satélites TERRA e AGUA estão operando a uma órbita polar heliossíncrona, com altitude orbital média de 705 km que alcança uma faixa de 2.330 km de extensão, com resolução temporal de 1 – 2 dias. O cruzamento equatorial do satélite TERRA e do AGUA é de aproximadamente às 10h30min e às 1h30min, respectivamente. As resoluções espaciais são de 250 m (bandas 1 – 2), 500 m (bandas 3 – 7) e 1000 m (bandas 8 – 36) (Tabela 1). Os instrumentos do MODIS têm uma alta sensibilidade de 12 bits - ou seja, as radiância detectadas são quantificadas em classes dinâmicas, implicando em 4.096 níveis digitais (PIROMAL et al., 2008) -, em 36 bandas espectrais, onde os comprimentos de onda variam de 0,4 μm a 14,4 μm . Desta forma, as respostas obtidas são personalizadas para as necessidades individuais do usuário (MODIS website, 2013).

O sensor MODIS é um instrumento eletro-óptico de varredura mecânica (Whiskbroom) que utiliza o movimento do satélite para fornecer um imageamento na direção do voo (along track). São imageados em cada banda, 10 fileiras de pixels para os detectores de 1 km; 20 para os de 500 m; e 40 para os de 250 m de resolução espacial. Os detectores do MODIS divididos em quatro planos focais: Infravermelho Termal (LWIR – Long Wave Infrared), Infravermelho Médio (SWIR/MWIR – Short/Medium Wave Infrared); Infravermelho Próximo (NIR – Near Infrared) e Visível (VIS – Visible) (LATORRE et al., 2003).

As 36 bandas espectrais são projetadas para evitar as bandas de absorção atmosférica e possibilitar a observação de propriedades das nuvens, dinâmica e propriedades da vegetação na superfície terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos (SOLOMONSON; TOLL, 1991; SOLOMONSON; BARKER, 1992).

2.1.4 PRODUTOS MODIS

O EOS (*Earth Observing System*), fundado pelo programa da NASA, “*Earth Science Enterprise*” (ESE), tem três componentes principais: coordenar uma série de satélites para a observação da Terra; um sistema avançado de dados designados para apoiar a produção, arquivamento e disseminação de dados oriundos dos satélites; e, desenvolvimento de algoritmos para a geração dos produtos específicos (JUSTICE et al., 2002 b).

Existem vários produtos, gerados a partir do MODIS, que os cientistas usam para estudar as mudanças globais, além de suas aplicações práticas. Neste sentido, segundo STRAHLER et al. (1999), o objetivo dos produtos gerados, basicamente, é quantificar e detectar as mudanças da cobertura terrestre, além dos processos naturais e antropomórficos, que, desta forma, auxiliam nos diversos modelos regionais e globais existentes.

Os produtos existentes para a superfície terrestre (Tabela 1), gerados pelo MODIS (MODLAND), estão no formato *Hierarchy Data Format* (HDF) para permitir uma maior transparência de acesso aos dados, através de um conjunto de ferramentas

específicas (LATORRE et al., 2003). Deste modo, o principal objetivo é gerar informações, tanto para as ciências que estudam a mudança global, quanto gerar aplicações práticas (JUSTICE et al., 2002b).

Tabela 1 Características gerais das bandas 1 a 36 do sensor MODIS.

Nome	Plataforma	Produtos	Resolução
MOD13Q1	Terra	Índice de vegetação	250 m
MOD09A1	Terra	Reflectância da superfície	500 m
MYD14A1	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD14A1	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD12A2	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD14A2	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD14	Aqua	Anomalias termais e fogo	1000 m
MYD13C2	Aqua	Índice de vegetação	5600 m
MOD13C3	Terra	Índice de vegetação	5600 m
MYD13C1	Aqua	Índice de vegetação	5600 m
MOD13C1	Terra	Índice de vegetação	5600 m
MYD13A3	Aqua	Índice de vegetação	1000 m
MOD13A3	Terra	Índice de vegetação	1000 m
MCD45A1	Combinado	Área queimada	500 m
MOD14	Terra	Anomalias termais e fogo	1000 m
MOD13A1	Terra	Índice de vegetação	500 m
MCD43A3	Combinado	Albedo	500 m

Fonte: MODIS (2015) (<https://lpdaac.usgs.gov>)

A seguir serão apresentados os principais produtos oriundos do sensor MODIS relacionados a detecção de focos de calor (registro instantâneo apenas da superfície com temperaturas elevadas devido à combustão) e detecção de áreas queimadas (extensão de vegetação destruída ou afetada pelo fogo):

2.1.5 DETECÇÃO DE FOCOS DE INCÊNDIOS (MOD14)

O MODIS Thermal anomalies – Fires and Biomass Burning (MOD14) diz respeito aos produtos de anomalias termais. O MOD14 inclui a ocorrência de incêndios (dia/noite), localização dos incêndios, os critérios utilizados para a seleção dos incêndios, cálculo de energia para cada incêndio detectado, além de composições de 8 e 30 dias de suas ocorrências (MODIS website, 2013). Segundo Justice et al. (2002b),

este produto é o mais básico entre os produtos disponíveis para a detecção de fogo ativo e anomalias termais.

Os produtos do nível 2 incluem a ocorrência de anomalias termais agrupadas em diferentes classes de temperaturas, além de vários parâmetros relacionados ao fogo recuperados diariamente com resolução de 1 Km, baseada na energia emitida pela queimada (LATORRE et al., 2003).

A detecção de fogo ativo do MODIS é baseada em algoritmos desenvolvidos para o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) e TRMM Visible and Infrared scanner VIRS. Esse algoritmo usa a temperatura do brilho derivado do MODIS canal 4 μm e 11 μm , denominado de T4 e T11, respectivamente. O algoritmo usa dois canais especiais para o fogo com 4 μm , chamados de canal 21 e 22. O canal 21 satura a aproximadamente 500°K e o canal 22 a aproximadamente 331°K. Uma vez que este canal de baixa saturação tenha menos ruído e possua um erro de quantização menor, a T4 é definida, sempre que possível. Por outro lado, quando o canal 22 satura, ou perde os dados, a T4, antes definida como um canal de baixa saturação, passa a ser definida como um canal de saturação mais elevada e o T11 é computado para 11 μm , canal 31, que satura a aproximadamente 400°K (LATORRE et al., 2003).

A banda do infravermelho próximo, com resolução de 250 m e 0.86 μm , é utilizada para identificar superfícies altamente reflectivas que são, provavelmente, as responsáveis dos alarmes falsos de queimadas (JUSTICE et al., 2002b).

A identificação de focos de incêndio baseia-se tanto na detecção absoluta, quanto na relativa das queimadas. Assim, algumas combinações de testes foram desenvolvidas por Justice et al. (2002b), de modo que, um pixel possa ser classificado como um incêndio durante o dia e durante a noite. Para evitar falsas detecções, todos os pixels em que $T4 < 315 \text{ K}$ (305 K para noturno) ou $T4 - T11 < 10 \text{ K}$ (3 K para noturno) ou $\rho_2 > 0.3$ (reflectância apenas para o dia) serão imediatamente eliminados como possíveis focos de incêndio. Para a detecção absoluta de incêndios, o algoritmo requer que duas condições sejam satisfeitas:

- a) $T4 > 360 \text{ K}$ (330 K para noturno)

b) $T_4 > 330 \text{ K}$ (315 K para noturno) e $T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}$ (10 K para noturno)

Para detecções relativas, caso os critérios relativos não sejam encontrados, o algoritmo acrescenta os valores médios mais 3 vezes o desvio padrão. Assim, para que um pixel seja classificado como uma queimada durante o dia, as seguintes condições precisam ser satisfeitas:

$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3 * \text{desvio padrão}(T_4) \text{ ou } T_4 > 330^\circ\text{K}\}$

e

$\{T_4 - T_{11} > \text{média}(T_4 - T_{11}) + 3 * \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}\}$

Para cálculos noturnos, tem-se

$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3 * \text{desvio padrão}(T_4) \text{ ou } T_4 > 315^\circ\text{K}\}$

e

$\{T_4 - T_{11} > \text{média}(T_4 - T_{11}) + 3 * \text{desvio padrão}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 10 \text{ K}\}$

Finalmente, quando ocorrer à possibilidade de detecções falsas para observações durante o dia, o pixel é rejeitado se os canais do vermelho e do infravermelho próximo com resolução de 250 m apresentarem reflectância acima de 30 % ou apresentar dentro de uma posição de 40° de reflexão especular (JUSTICE et al., 2002b).

2.1.6 DETECÇÕES DE ÁREAS QUEIMADAS (MCD45A1)

O produto MODIS MCD45A1 disponibilizado mensalmente, com nível 3 de processamento e resolução espacial de 500 m, oferece a informação da quantidade de área queimada, bem como a qualidade da informação disponibilizada para cada pixel. É produzido a partir dos dados de reflectância da superfície do sensor MODIS, abordo do satélite Terra e Aqua, o algoritmo utilizado analisa a dinâmica diária de reflectância da superfície para localizar mudanças rápidas, em relação as mudanças espectrais, temporais e na estrutura da vegetação, assim consegue mapear a data aproximada da queima, além da extensão espacial (BOSCHETTI et al., 2013).

Esse produto está disponível no formato Hierarchical Data Format (HDF), um formato pouco difundido e que agrega grande volume de informações e variados tipos de metadados, por isso, para ser utilizado os arquivos devem ser exportados para o formato Geo-referenced Tagged Image File Format (GeoTIFF). Para a conversão dos dados, foi utilizada a ferramenta Modis Reprojection Tools (MRT), que é oferecido pela

Land Processes Distributed Active Archive Center (LPADAAAC). A instalação do programa exige que o usuário configure manualmente a interação entre o MRT e a ferramenta JAVA.

O produto disponibiliza oito subprodutos, detalhados a seguir (BOSCHETTI et al., 2013):

1. **Burn date** (2 bytes): Dias julianos aproximado da queima para oito dias antes de começar o mês e oito dias depois de terminar o mês. Os códigos indicam a situação do pixel.
 - 0 – não queimado
 - 1 – 366 – dia juliano da queima
 - 900 – neve ou aerossóis
 - 9998 – corpos d’água (continentais)
 - 9999 – corpos d’água (mares e oceanos)
 - 10000 – dados insuficientes
2. **BA pixel QA** (1 byte): Nível de confiança da detecção da queimada. Varia de 1 a 5, onde 1 são os *pixels* de confiança máxima, 4 são os *pixels* de confiança mínima e 5 são os *pixels* classificados como áreas queimadas, mas ocorrem sobre agricultura (com base no produto MCD12).
3. **Number of Passes** (1 byte): Número de observações quando passa pelo teste de consistência temporal.
4. **Number Used** (1 byte): Número de observações usado pelo teste de consistência.
5. **Direction** (1 byte): Direção no tempo em que a queimada foi detectada (frente, atrás ou os dois).
6. **Surface Type** (1 byte): Informações sobre o tipo de cobertura e suas propriedades.
7. **Gap Range 1** (2 bytes): Indica o maior período em que ficou nublado, ou seja, dificultou a identificação das áreas queimadas.
8. **Gap Range 2** (2 bytes): Indica o segundo maior período em que ficou nublado, ou seja, dificultou a identificação das áreas queimadas.

2.1.7 O ALGORITMO MCD45A1

O algoritmo do produto MCD45A1 foi desenvolvido com base nas mudanças espectrais, temporais e estruturais dos alvos. O algoritmo utiliza o modelo Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional de Superfície (BRDF) para detectar, a partir

de uma série diária de dados, a data aproximada de mudanças bruscas na cobertura da terra, por exemplo, queima de biomassa (BOSCHETTI et al., 2013).

Devido ao amplo campo de visada do sensor MODIS, existem variações das reflectância de superfície geradas pela variação nos ângulos de elevação solar e visada do satélite (dependência direcional da reflectância), assim a BRDF é utilizada para computar essas variações. A BRDF baseia-se em informações semi-físicas e é utilizada para prever mudanças na reflectância de superfície a partir do estado anterior (ROY et al., 2008; ROY et al., 2002; RIVEIRA-LOMBARDI, 2009). A partir de medidas estatísticas, é determinado se a diferença entre a reflectância prevista e observada é uma mudança de interesse significativo. Por exemplo, sombra e áreas queimadas têm respostas espectrais semelhantes, porém, áreas queimadas são mais persistentes em uma janela temporal, na ordem de alguns dias (BOSCHETTI et al., 2013).

Entretanto, é necessário ressaltar que a BRDF é utilizada pelo algoritmo MCD45 para observar as variações angulares encontradas nos dados MODIS e não para minimizar os efeitos da dependência direcional da reflectância (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

A geração do produto MCD45 se baseia na inversão do modelo linear de *kernels*, conhecido como *RossThick-LiSparseReciprocal* BRDF. No algoritmo essa inversão é feita para cada pixel geolocalizado das bandas 2 e 5, em um mínimo $m \geq 7$ observações da reflectância de superfície em uma janela temporal de $n \geq 16$ dias (BOSCHETTI et al., 2013). São definidas janelas de 16 dias, pois a observação de uma mesmo pixel, em iguais condições de geometria de iluminação e de visada do sensor, só ocorrem a cada 16 dias (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

A após a reduções das variações oriundas da dependência direcional da reflectância através do modelo BRDF, calcula-se o Z-score (Equação 1.1), que é uma medida normalizada para estimar a probabilidade de uma nova observação pertencer ou não ao mesmo conjunto utilizado pelo modelo BRDF invertido, ou seja, se realmente existem mudanças nas reflectâncias de superfície (BOSCHETTI et al., 2013).

$$Z_{\lambda} = \frac{\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda, \Omega, \Omega')}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\sigma_{\lambda}^2 + e^2 \frac{1}{w}} \quad (1.2)$$

Onde, Z_{λ} é o valor do Z-score, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o novo valor observado da reflectância; $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor da reflectância predito pelo modelo em um dado comprimento de onda λ , computado pela inversão do modelo BRDF; Ω e Ω' são os ângulos de visada e iluminação dos novos valores de reflectância observado, respectivamente; ε é o erro do modelo BRDF; σ_{λ} é um valor fixo estimado do ruído em $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$; e é a raiz quadrada média dos resíduos do modelo BRDF invertido; e w é o peso determinado para $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$.

O Z-score é calculado para as bandas 2 e 5 do sensor MODIS, pois ambas as bandas são sensíveis à queima (BOSCHETTI et al, 2013). No entanto, a partir de operadores lógicos, os resultados são testados em relação a limiares espectrais definidos pelas características do ruído nas refletâncias observadas (Z_{limiar}), bem como pelas propriedades espectrais da vegetação afetada pelo fogo (λ_{banda7}).

Assim, as observações serão consideradas como candidatas a áreas queimadas se:

$$(Z_{banda2} < -Z_{limiar}) \text{ ou } (Z_{banda5} < -Z_{limiar})$$

Onde, Z_{banda2} e Z_{banda5} é o Z-score da banda 2 e 5; Z_{limiar} é um limiar de reflectância preestabelecido para um determinado comprimento de onda. Assim, valores acima do limiar estabelecido, não serão considerados candidatos a queimada. Valores negativos persistentes durante vários dias, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ menor que $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$, indicam que ocorreu uma queda nas refletâncias observadas das bandas 2 ou 5 em relação às refletâncias preditas, logo após a ocorrência do fogo. Enquanto que incrementos de reflectância resultam em valores positivos e estão associados a presença de nuvens, ruídos e outros (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

Novas observações de reflectância também serão consideradas como candidatas a áreas queimadas, se:

$$\rho(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho_n(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho_n(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega')$$

$$\rho(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho_n(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho_n(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega')$$

Onde, $\rho_n(\lambda, \Omega, \Omega')$ é a nova reflectância observada e $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor de reflectância predito a partir da BRDF invertido.

Segundo ZARCO-TEJADA et al. (2003), a banda 2 contribui com informações associadas às mudanças de conteúdo de água nas folhas, contrário com as bandas 5 e 7, devido aos maiores comprimentos de onda. Assim, segundo as condições citadas (4 e 5), as novas observações da reflectância serão consideradas candidatas a áreas queimadas se as diferenças entre reflectância dos valores observados e preditos, obtidos a partir da banda 2 e 5, resultarem em um decréscimo em relação a banda 7 (RIVEIRA-LOMBARDI, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo envolveu toda a área do bioma Cerrado. De modo geral, a precipitação média anual deste bioma oscila entre 1200 e 1800 mm, sendo que a precipitação média mensal apresenta uma grande sazonalidade, concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março), que define a estação chuvosa na região. Na vertente oposta, o bioma apresenta uma estação seca de 3 a 5 meses de duração (maio a setembro).

Para a análise das mudanças nas propriedades espectrais em áreas afetadas por incêndios florestais, foram selecionados 40.661 pontos amostrais de forma sistemática-aleatória. Tal amostragem buscou representar a variabilidade espacial das fitofisionomias do Cerrado e suas respectivas variações espectrais diante da ocorrência de incêndios florestais.

Foram observadas cinco fitofisionomias predominantes no bioma Cerrado. De acordo com o sistema brasileiro de classificação da vegetação (IBGE, 1992), as fitofisionomias com características florestais são Floresta Estacional semidecídua, Floresta Estacional decídua, Floresta Pluvial, Savana Arborizada e Savana Parque.

Segundo o sistema de classificação do Cerrado proposto por RIBEIRO e WALTER (1998), as fitofisionomias Floresta Estacional decídua, Savana Arbórea e Savana Parque são equivalentes à Mata Seca, ao Cerrado stricto sensu e ao Cerrado ralo, respectivamente. As fitofisionomias savânicas predominantes na região do bioma Cerrado são respectivamente: Savana arborizada sem floresta de galeria, Savana florestada, Savana arborizada com floresta de galeria e, e Savana gramíneo-lenhosa com floresta de galeria.

3.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DE VEGETAÇÃO E MODIS ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E QUEIMADAS

Para definição e caracterização do bioma estudado neste trabalho, foram utilizados como base um mapa de biomas do Brasil, na escala de 1:5.000.000 (IBGE, 2004a) e um mapa de vegetação do bioma Cerrado, na escala de 1:250.000 (MMA, 2002).

Para avaliação temporal das diferentes fisionomias no bioma estudado, foram utilizados mosaicos de um conjunto de 281 mosaicos de imagens do EVI (Índice de Vegetação Melhorado), com resolução espacial de 250 m, período de composição do produto de 16 dias e resolução radiométrica de 16 bits, no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2013, derivadas do sensor MODIS/Terra, produto MOD13Q1. Todos os dados foram preparados pela NASA e disponibilizados no sítio da internet do Serviço Geológico Americano (USGS): <http://www.usgs.gov>. A detecção áreas incêndios Florestais foi obtida pelo produto MCD45A. O algoritmo para mapear áreas incêndios florestais detecta a data aproximada de queima com resolução de 500 metros e pode localizar a ocorrência de mudanças na reflectância de superfície diariamente, possibilitando assim a construção de series temporais, para este estudo foram utilizados dados do período de janeiro de 2001 a dezembro de 2013. Os dados das áreas atingidas por fogo também foram adquiridos no sítio da internet do Serviço Geológico Americano (USGS):https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd45a1.

Em relação às imagens MODIS, foram consideradas cinco imagens para formar uma cena de toda a região (mosaico) do bioma Cerrado (H12V10, H12V11, H13V09, H13V10 e H13V11). A figura 1 mostra o esquema de amostragem aleatória estratificada nas regiões selecionadas para o estudo.

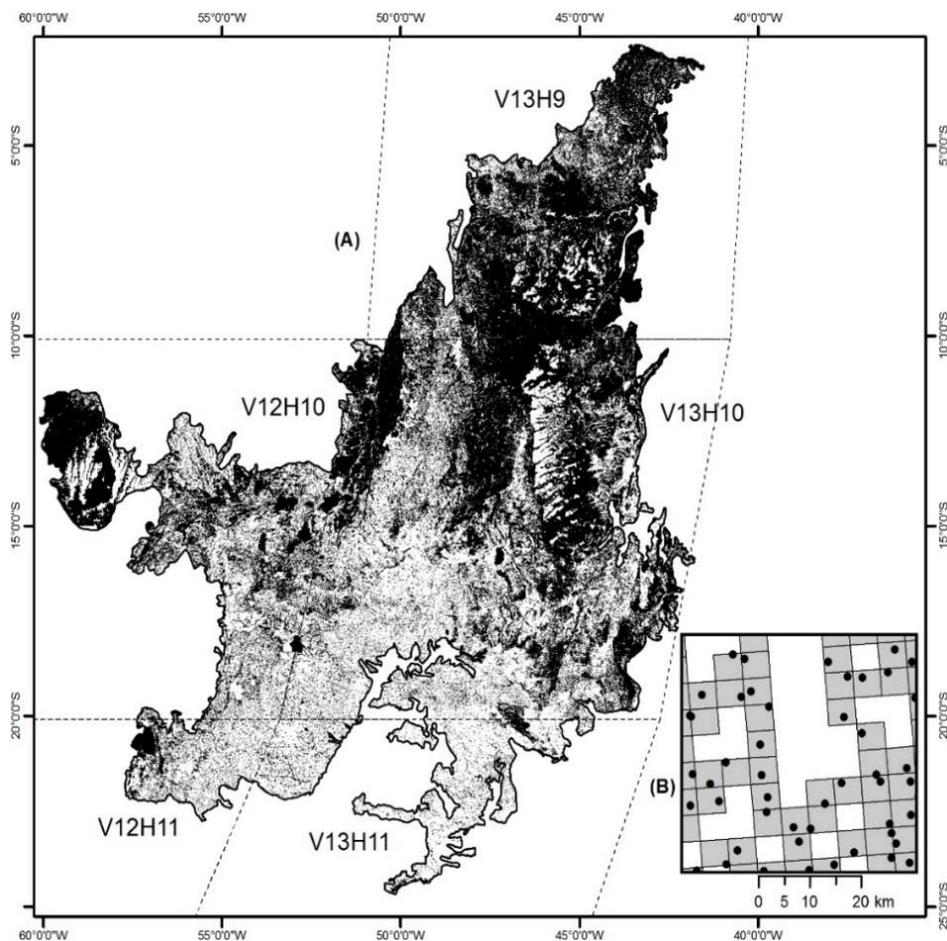


Figura 1 - A) remanescentes de vegetação natural incidente no bioma Cerrado. B) exemplo da distribuição amostras aleatórias em quadriculas sistemáticas de 5x5 km.

Os índices de vegetação foram propostos para a melhoria do sinal refletido pela vegetação a partir da resposta espectral de dois ou mais comprimentos de onda combinados, normalmente nas regiões dos comprimentos de onda vermelho (0,6 - 0,7 μ m) e infravermelho próximo (0,7 - 1,1 μ m). A base teórica dos índices advém da análise das curvas de assinatura espectral da reflectância das folhas. Enquanto a energia

refletida na região do visível é muito baixa devido a sua absorção pelos pigmentos fotossintéticos, na região do infravermelho próximo a radiação é quase totalmente refletida (HUETE et al., 2002). O índice de vegetação melhorado (EVI), aplicado neste estudo, utiliza informações na região espectral do infravermelho próximo, região do vermelho e a reflectância na faixa do azul para indicar o vigor vegetativo, este índice permite um melhor monitoramento da vegetação através da redução de substrato do dossel e da influência da atmosfera. A sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além do monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas. O EVI pode ser calculado através da seguinte equação (JUSTICE et al.,1998):

$$EVI = G * ((NIR - vermelho)) / ((L + NIR + C1 * vermelho - C2 * azul))$$

Onde L é fator de ajuste para o solo; e C1 e C2 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera. Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são: L=1, C1=6, C2=7,5 e o fator de ganho G= 2.5, NIR- banda no comprimento do Infravermelho próximo (HUETE et al., 1997; JUSTICE et al., 1998).

O pré-processamento das imagens MODIS envolveu as etapas de mudança de projeção cartográfica e recorte da área de interesse. Este procedimento foi realizado de forma automática pelo programa MODIS *Reprojection Tool* (MRT). Neste procedimento, é necessário informar o retângulo referente à área de estudo, a projeção, a resolução espacial e o tipo de interpolação a ser utilizada. Todos os dados foram re-amostrados para 250 m no sistema de coordenadas geográficas (datum:WGS-84), com intuito de facilitar a integração dos dados em diferentes programas.

3.3. AMOSTRAGEM UTILIZADA

A partir dos mosaicos gerados para os 13 anos de estudo, foram extraídos os valores absolutos de EVI para cada um dos pontos amostrais, preservando os metadados referentes, a tipologia da vegetação ao ano e a datas das imagens, e o dia dos incêndios Florestais. Para as análises, os valores utilizados foram as médias de EVI das formações de vegetação natural e as médias dos períodos temporais, anos e dias julianos.

Para uma análise mais detalhada do comportamento temporal do EVI, as amostras foram estratificadas em amostras com incêndios florestais e amostras sem

incêndios Florestais. Para as amostras com incêndios florestais foram observados os períodos da véspera e períodos de 48, 32 e 16 dias antes e após.

Para a amostragem da vegetação nativa do Cerrado, o bioma foi dividido em quadriculas sistemáticas de 5x5 km largura, garantindo uma boa distribuição espacial das amostras sobre toda cobertura vegetal natural do bioma. Sobre cada quadricula foi aleatorizado um ponto, para evitar as tendências das quadrículas sistemáticas, totalizando então 41.660 amostras. Essa estratégia possibilitou a amostragem da mesma superfície de vegetação nativa e dos incêndios florestais. Entretanto, devido à variabilidade da distribuição da vegetação atingida ou não por fogo, o número total de pontos amostrados foi diferente entre as amostras “com fogo” (14894) e “sem fogo” (26729).

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi elaborada uma série temporal tabular para cada classe de vegetação natural do bioma cerrado. Inicialmente, foi realizada uma análise exploratória entre estas variáveis, por meio de análise gráfica.

Para a análise da dependência temporal do efeito das queimadas nos dados de EVI, foi conduzida uma análise de correlação entre as médias dos dias antes e após ocorrência do fogo para possibilitar o melhor entendimento da dependência dos dados de uma amostra no tempo. Também foram calculadas as diferenças temporais apresentadas anualmente e mensalmente entre as séries 48, 32 e 16 dias. Para testar a diferença dos efeitos do fogo em toda a população (vegetação do Cerrado) foram utilizados testes estatísticos paramétricos (teste T e ANOVA) e não paramétrico (Teste de Mood).

Buscando a avaliação da similaridade da resposta espectro-temporal das diferentes amostras com valores do EVI, foi realizada a análise de agrupamentos hierárquicos. Neste método, a distância máxima entre os grupos de amostras é estimada por meio da matriz de distância euclidiana entre os pares de amostras. Para o processo de agrupamento, foi utilizado o método de ligação completa entre os grupos ("*farthest*

neighbor") (SHARMA, 1996). Com isso, espera-se que amostras com cobertura similar de EVI tendam a ter comportamento espectro-temporal análogo, o que resulta em distâncias menores entre elas. Os resultados desta análise foram apresentados na forma de um dendrograma, o que permite visualizar a distância entre os grupos no espaço (SHARMA, 1996).

3.5. AVALIAÇÕES DE ACURÁCIA DA RESPOSTA DO PRODUTO DE EVI MOD13Q1

Os produtos de áreas atingidas pelo fogo neste estudo foram utilizados somente para qualificação das amostras como queimadas ou não queimadas. Todos os produtos utilizados nesta análise o MCD45A1 e MOD13Q1 detém uma ampla validação de dados, com experimentos globais de avaliação da acurácia dos mesmos, portanto considerou-se que estes produtos já possuem uma base científica de validação e acurácia, no entanto devem ser utilizados com as devidas ressalvas para cada tipo de aplicação.

Análises de várias campanhas de validação no ar e no campo demonstram que sobre a maioria dos biomas, que os índices de vegetação do MODIS têm muito boa concordância com as propriedades biofísicas da superfície terrestre (TURNER et al 2006). Comparações sazonal com dados torre de fluxo sazonal (FLUXNET) mostram que as medidas de produção primária bruta têm uma forte concordância os dados entre torre e calibração de imagens.

Para validar os resultados dos efeitos dos incêndios florestais estimados a partir de dados de EVI do produto MOD13Q1, utilizou-se a cena 221/70 do satélite LANDSAT 8 OLI (*Operational Land Imager*) do ano de 2014 como ano base escolhido para validação da resposta da vegetação aos incêndios florestais. As imagens foram obtidas junto ao Serviço geológico dos estados unidos (USGS) nas datas 5-jan,6-fev,12-mai,28-mai,13-jun,29-jun,15-jul,31-jul,16-ago,1-set,17-set e 3-out. Foram também utilizados novos dados MODIS de EVI para o ano de 2014, sendo as datas escolhidas o mais próximo possível as tomadas pelo LANDSAT, sendo elas: 1-jan,17-jan,2-fev,18-fev,8-mai,24-mai,9-jun,25-jun,11-jul,27-jul,12-ago,28-ago,13-set,29-set e 15-out.

O EVI para as cenas correspondentes do LANDSAT 8 foram calculados pelo USGS (Serviço Geológico Americano) e utilizado na análise comparativa com o sensor MODIS, aplicando o fator de ganho $G=2.5$ sugerido por Huete et al. (1997). Conforme o guia de produtos derivados da reflectância de superfície o índice pode ser calculado com a seguinte formula:

$$EVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + 7 * Banda\ 4 - 7.5 * Banda\ 2 + 1)$$

Primeiramente foram sobrepostos os focos de calor do ano de 2014 obtidos pelo programa *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS) do Sistema de Observações de dados Terrestres (EOSDIS) da Administração de Aeronáutica e Espacial Norte-Americana (NASA) que recobriam a cena 221/70 do LANDSAT8 a fim de validar o efeito da resposta da vegetação antes e depois da queima compara-la as respostas das imagens MODIS. Assim, os resultados obtidos a partir do EVI das imagens LANDSAT 8 foram utilizados como verdade terrestre, por apresentarem melhor resolução espacial, isto é, foram usados como referência para a validação da resposta do produto MOD13Q1, em 2014.

Ressalta-se que para evitar a superestimava dos resultados foi preciso filtrar as áreas queimadas do produto, obtendo, assim, somente as áreas queimadas em vegetação natural para a escala do produto MOD13Q1 e de acordo com as classes do PROBIO.

Para avaliar a precisão dos resultados de EVI do produto MOD13Q1 foi gerada uma análise de correlação a partir da dos focos de calor em 2014 gerados pelo EOSDIS (Figura 2). Foram extraídos destes pontos os valores de EVI das imagens LANDSAT8 e MODIS.

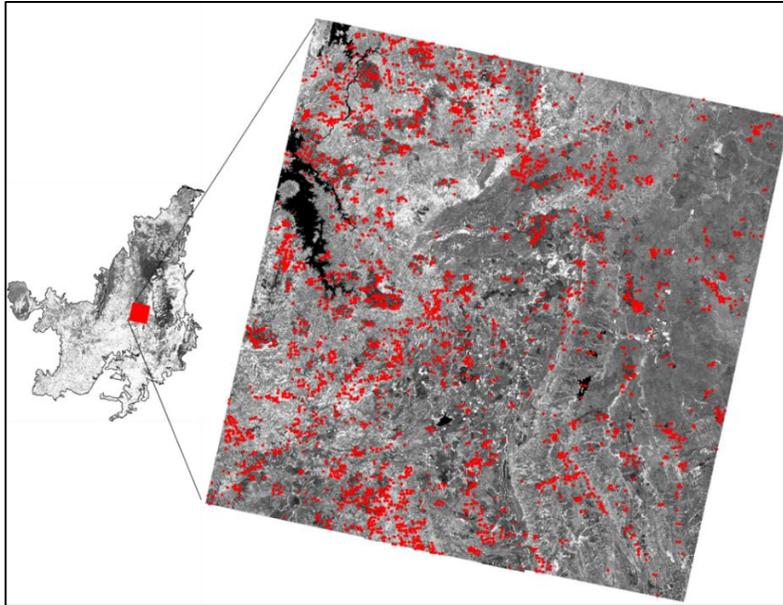


Figura 2 - Pontos de focos de calor de 2014 gerados pelo EOSDIS sobre a imagem do EVI derivado da cena 221/070 do LANDSAT 8 OLI.

A avaliação de acurácia de resposta do índice de vegetação entre dois sensores distintos, depende de uma série de fatores, tais como: complexidade do terreno, as resoluções espaciais e espectrais do sensor, o algoritmo utilizado para a obtenção do índice vegetação, e o conjunto de dados que representa a verdade do terreno (HUETE et al. 1997).

A extração dos valores de EVI nas imagens LANDSAT para os focos de calor que representam também área queimada foi feita utilizando a amostragem de interpolação bilinear, que usa o valor dos quatro centros de célula de entrada mais próximos para determinar o valor sobre a imagem de saída. O novo valor para a célula é uma média ponderada desses quatro valores, ajustado para a sua distância do centro da célula de saída. Este método de interpolação resulta em uma aparência mais suave.

Na ilustração a seguir (Figura 3), na interpolação de vizinho mais próximo, os centros de células da imagem de entrada estão em pontos cinzentos, as células de saída são sombreadas em verde, e a célula que está sendo processado é sombreada em amarelo. Por interpolação bilinear, os quatro centros de células de entrada (pontos de

laranja) mais próximo do centro da célula de processamento (ponto vermelho) são identificadas, a média ponderada é calculada e o valor resultante é designado como o valor de saída para a célula de processamento (amarelo sombreado).

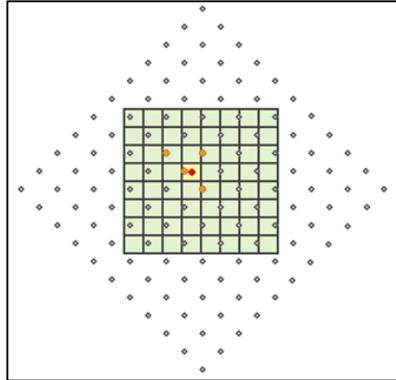


Figura 3–Modelo de interpolação bilinear utilizado na extração dos valores de EVI do LANDSAT 8 OLI.

Para efeito de comparação dos resultados de EVI entre LANDSAT 8 (variável independente) e o produto MOD13Q1(variável dependente) a análise de correlação e a análise de regressão são os métodos estatísticos que foram utilizados para estudar o grau de relacionamento entre a resposta do EVI dos dois sensores.

A análise de correlação fornecerá um número, indicando como as duas variáveis variam conjuntamente. Medindo a intensidade e a direção da relação linear ou não-linear entre duas variáveis. É um indicador que atende à necessidade de se estabelecer a existência ou não de uma relação entre essas variáveis sem que, para isso, seja preciso o ajuste de uma função matemática.

A análise de regressão, além de medir a associação entre a variável de dados resposta do EVI do LANDSAT8 e um conjunto de dados do MOD13Q1, também estimará os parâmetros do comportamento sistemático entre os sensores. O objetivo é estudar a relação entre as variáveis, com a análise de regressão simples linear, e determinar o grau de relacionamento entre as variáveis analisadas.

O modelo estatístico de regressão linear utilizado é $Y = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i$ onde:

β_0 = constante de regressão. Representa o intercepto da reta com o eixo dos Y .

β_1 = coeficiente de regressão. Representa a variação de Y em função da variação de uma unidade da variável X

e_i = é o erro que está associado à distância entre o valor observado Y_i e o correspondente ponto na curva, do modelo proposto, para o mesmo nível i de X .

O coeficiente β_1 é o coeficiente angular ou inclinação da reta de regressão amostral; sendo assim, ele estima o quanto Y varia quando X varia de 1 unidade. Por outro lado, o coeficiente de correlação entre duas variáveis mede o grau de associação linear entre elas. Sendo assim, é razoável esperar que haja alguma relação entre β_1 e o coeficiente de correlação entre X e Y .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. VALIDAÇÃO DO PRODUTO MOD13Q1

A validação do produto MOD13Q1 foi feita com base nos resultados da matriz de correlação e regressão linear entre os dados de focos de calor do EOSDIS e os EVI derivados de imagens do satélite LANDSAT-8 e MODIS. De acordo com os resultados apresentados na matriz de correlação (tabela 2), os 13 períodos relacionais LANDSAT8/MODIS tomados como indicadores apresentam uma maior correlação com pelo menos dois outros períodos subsequentes. Todos os coeficientes de correlação são estatisticamente significantes de acordo com o teste de significância valor- p , p -value ou nível descritivo.

Dentro do período de estudo, a maior correlação positiva foi observada nos meses entre maio e outubro. Estes são os meses quando a interferência de fatores atmosféricos é menor e os incêndios florestais são mais frequentes e mais intensos. A matriz de correlação demonstra então a existência de uma linearidade na resposta entre os dois sensores com as variações sazonais da vegetação na estação mais seca.

Tabela 2 - Matriz de correlação de focos de calor detectados pelo EOSDIS em 2014 e EVI derivado de imagem LANDSAT 8 cena 221/70 e imagens MODIS produto MOD13Q1.

		MOD13Q1												
		1-jan	17-jan	2-fev	8-mai	24-mai	9-jun	25-jun	11-jul	27-jul	12-ago	28-ago	13-set	29-set
LANDSAT8	5-jan	0,499	0,499	0,499	0,477	0,396	0,355	0,300	0,255	0,251	0,239	0,247	0,154	0,095
	6-fev	0,439	0,438	0,438	0,468	0,443	0,408	0,361	0,342	0,344	0,318	0,285	0,255	0,220
	12-mai	0,441	0,441	0,441	0,470	0,445	0,409	0,362	0,343	0,345	0,320	0,286	0,256	0,221
	28-mai	0,474	0,473	0,473	0,718	0,680	0,630	0,593	0,549	0,529	0,495	0,457	0,404	0,316
	13-jun	0,473	0,473	0,473	0,718	0,680	0,630	0,593	0,549	0,529	0,495	0,457	0,404	0,316
	29-jun	0,338	0,337	0,337	0,635	0,625	0,624	0,597	0,552	0,535	0,500	0,452	0,397	0,342
	15-jul	0,305	0,304	0,305	0,567	0,633	0,636	0,686	0,710	0,692	0,651	0,550	0,503	0,447
	31-jul	0,286	0,286	0,286	0,533	0,593	0,596	0,652	0,696	0,701	0,674	0,567	0,520	0,461
	16-ago	0,283	0,282	0,283	0,476	0,528	0,535	0,594	0,647	0,664	0,704	0,601	0,552	0,485
	1-set	0,237	0,237	0,236	0,412	0,450	0,463	0,504	0,545	0,567	0,600	0,696	0,589	0,451
	17-set	0,231	0,230	0,230	0,365	0,407	0,427	0,470	0,500	0,521	0,549	0,617	0,730	0,610
	3-out	0,183	0,182	0,184	0,306	0,349	0,364	0,410	0,444	0,465	0,482	0,498	0,613	0,718

A partir da análise de regressão linear, foi possível observar uma relação funcional entre os resultados de EVI derivados de imagens LANDSAT8 e EVI dos produtos MOD13Q1. O Diagrama de dispersão (figura 4) para o estudo do comportamento conjunto das variáveis representa graficamente o conjunto de dados. Tais resultados mostram que existe a correlação positiva das respostas do EVI derivado do LANDSAT 8 com o EVI do produto MOD13Q1.

O coeficiente de determinação R^2 para cada período correspondente entre o EVI do LANDSAT 8 e do MOD13Q1 forneceu uma informação auxiliar ao resultado da análise de variância da regressão. Tal resultado permitiu verificar a adequação do modelo proposto para descrever a equidade das respostas entre os sensores temporalmente. Para isso, foi realizada análise de regressão do ano de 2014 para as médias anuais dos valores de EVI dos pontos amostrais entre os sensores LANDSAT8 e MODIS.

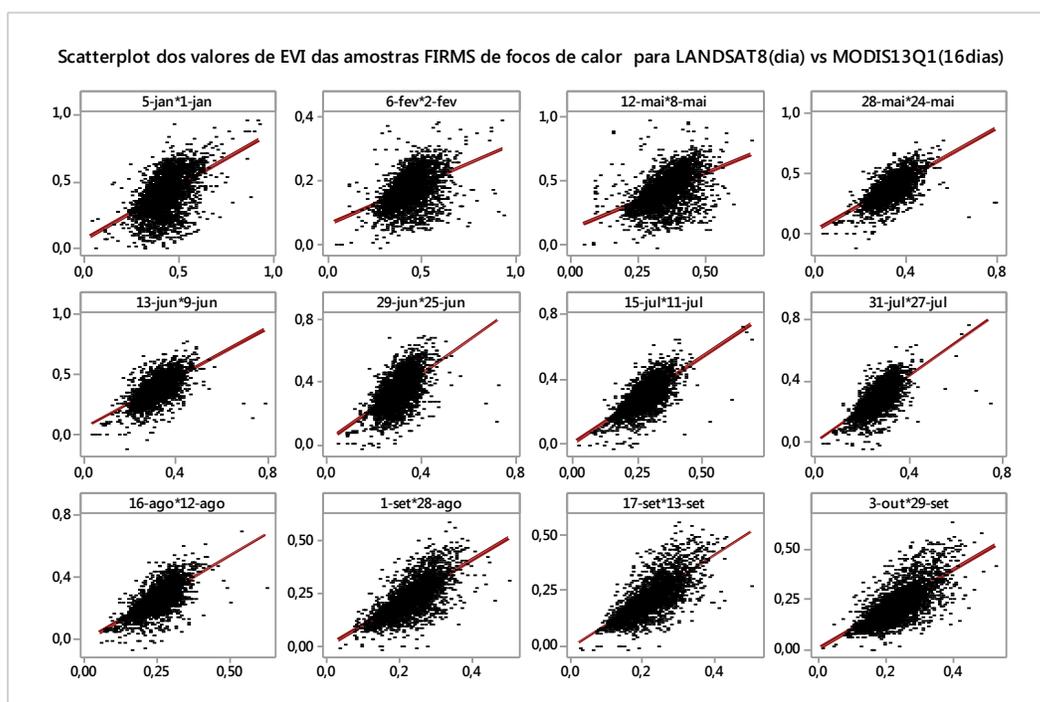


Figura 4 – diagrama de dispersão dos valores de EVI (Landsat 8 x MOD13Q1) e dos pontos de focos de calor de 2014 do FIRMS-EOSDIS

Os resultados indicam que de maneira geral existe uma correlação positiva entre a resposta dos dois sensores ao EVI. O coeficiente de correlação $r = 0,74$ e o coeficiente de determinação $R^2 = 0,55$ indicam resultados semelhantes a outros estudos, como o de HASSAN et al., 1997, onde estimativa de índice de vegetação do LANDSAT tem uma relação semelhante entre as respostas do produto MOD13Q1.

O perfil do EVI obtido pelos sensores MOD13Q1 e Landsat 8 mostrou padrão similar, descrevendo as condições de crescimento e desenvolvimento da vegetação, o qual é determinado pela dinâmica da vegetação natural e pelas condições meteorológicas. Ambos sensores expressam similaridade na resposta do Índice de vegetação, mas os dados Landsat 8 são maiores do que os obtidos nas imagens MOD13Q1 o que justifica o coeficiente de regressão positivo. Há maior pureza no EVI proveniente do Landsat 8. Já as imagens MOD13Q1 permitem um maior detalhamento temporal, maior abrangência regional e menor necessidade de pré-processamentos, sendo mais adequado para fins de monitoramento.

Na Figura 5 é possível observar que um ajuste ao modelo de regressão sofre influência de algumas amostras que obtiveram valores extremos e provocam maiores resíduos. Observando o conjunto o histograma dos resíduos que mostram características gerais dos resíduos, observa-se maior frequência em valores de EVI de -0,2 a 0,2 incluindo os valores típicos, propagação, forma, e probabilidade de resíduos. O gráfico de resíduos versus valores ajustados mostra um padrão aleatório de resíduos em ambos os lados de 0.

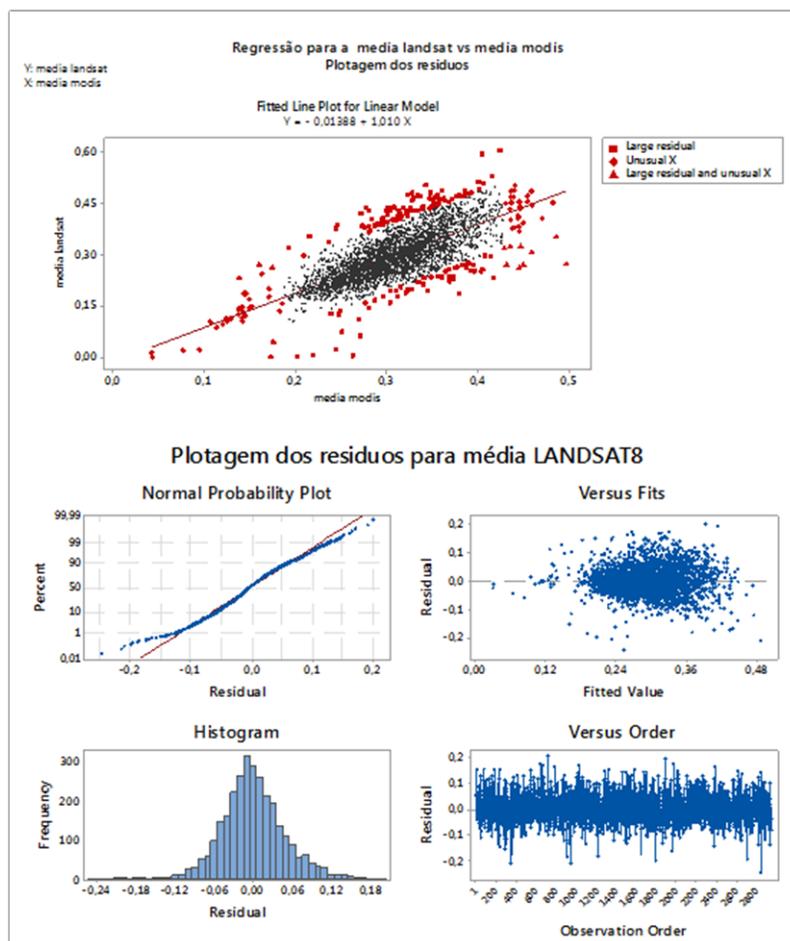


Figura 5 - Diagrama de dispersão dos valores de EVI dos pontos de focos de calor de 2014 detectados para as variáveis de datas próximas das imagens LANDSAT 8 OLI cena de orbita ponto 221/70 (EVI) e Conjunto de gráficos demonstrando os efeitos dos resíduos obtidos pela aplicação da equação do modelo linear de regressão (*media Landsat = -0,01388 + 1,0103 media Modis*)

4.2. COESÃO ENTRE A RESPOSTA DO LANDSAT8 E MODIS

A série LANDSAT8 sintética foi obtidas originalmente em resolução espacial de 30 m, tendo o valor de EVI sido degradado para resolução espacial de 250 m utilizando o método de interpolação bilinear (Figura. 6a). As imagens MODIS (Figura 6b) foram obtidas originalmente em resolução espacial de 250 m, e o EVI derivado das imagens MODIS, foram gerados sem interpolação, em resolução espacial de 250 m. Intrinsecamente, a comparação entre sensores de resolução espacial diferentes gera por comissão variações nos valores de EVI. Além disso, os pontos focos de calor do EOSDIS representam uma célula de 500 metros e também podem variar em exatidão sobre o posicionamento em cicatrizes de queimadas. Um outro fator de que pode influenciar majoritariamente os resultados de uma análise comparativa entre os produtos MOD13Q1 e imagens LANDSAT8 é o fato de que as imagens MODIS serem híbridas de 16 dias, ou seja, não são instantâneas como as LANDSAT8. Assim, os valores de EVI de uma imagem para outra podem estar defasados ou tonificados.

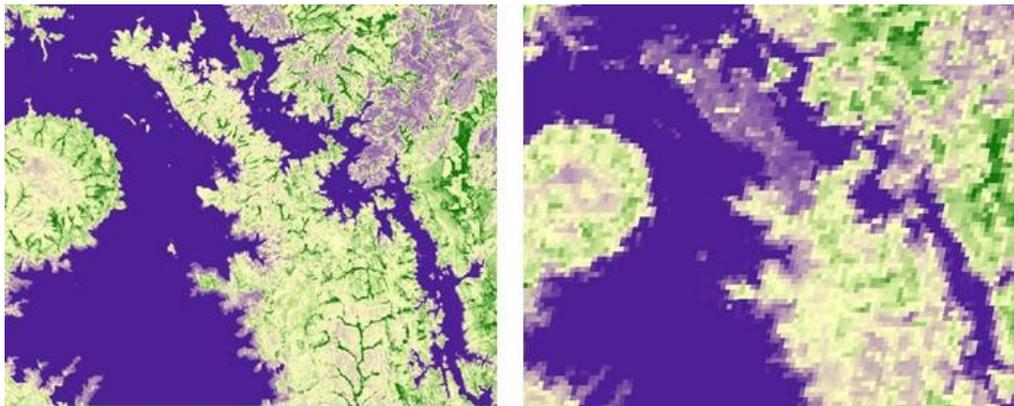


Figura 6 – (a) imagem de 1 setembro 2014 LANDSAT EVI com resolução de 30 metros. (b) imagem MODIS composta de 16 dias (28 de agosto a 13 de setembro).

A maior área que teve a concentração de focos de calor em 1 de setembro de 2014 (Figura 7) mostra exemplos dos resultados das intercomparações temporais de áreas exclusivamente queimadas da série temporal de EVI sintético LANDSAT8 e MOD13Q1.

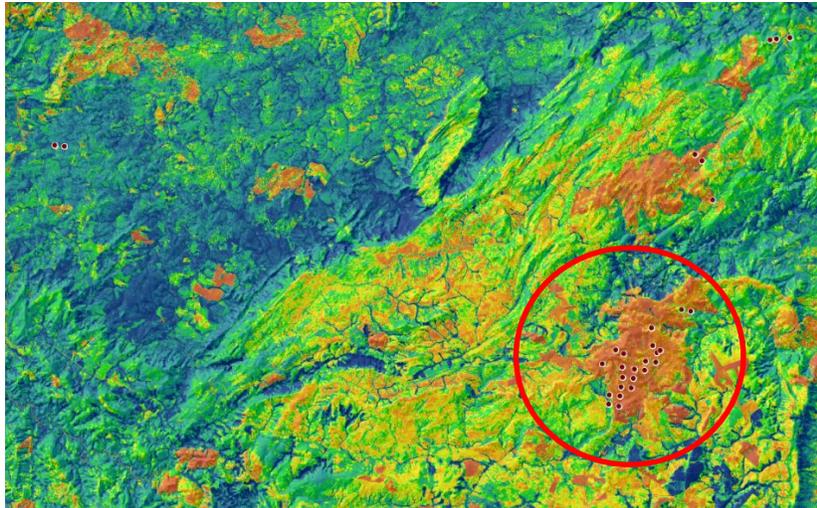


Figura 7 – Imagem de 1 setembro de 2014 LANDSAT8 EVI mostra os focos de calor gerados pelo EOSDIS do dia e indicando que as áreas mais avermelhadas possuem menor EVI e as azuladas maiores EVI.

Na comparação entre os valores de EVI de imagens Landsat 8 e MODIS para media geral das amostras com incêndios, verificou-se que em geral os dados Landsat 8 são maiores do que os obtidos nas imagens MODIS (Figura 8). Este fato pode ser associado maior pureza espectral do pixel Landsat 8 de 30m. É maior, a probabilidade de, com pixel de 250 metros do MODIS, informações espectrais de outros alvos presentes na área imageada (exemplo corpos d'água) estarem contribuindo para o valor médio de MODIS.

Parte das diferenças no NDVI dos dois sensores decorre, ainda, do fato de que as medições não necessariamente coincidem no tempo. O NDVI do Landsat 8-OLI provém de uma imagem adquirida instantaneamente (no dia da aquisição), enquanto que aquele proveniente do MODIS é obtido a partir de uma amostragem temporal de um período de 16 dias consecutivos, em que o maior valor do índice é utilizado para a imagem composta.

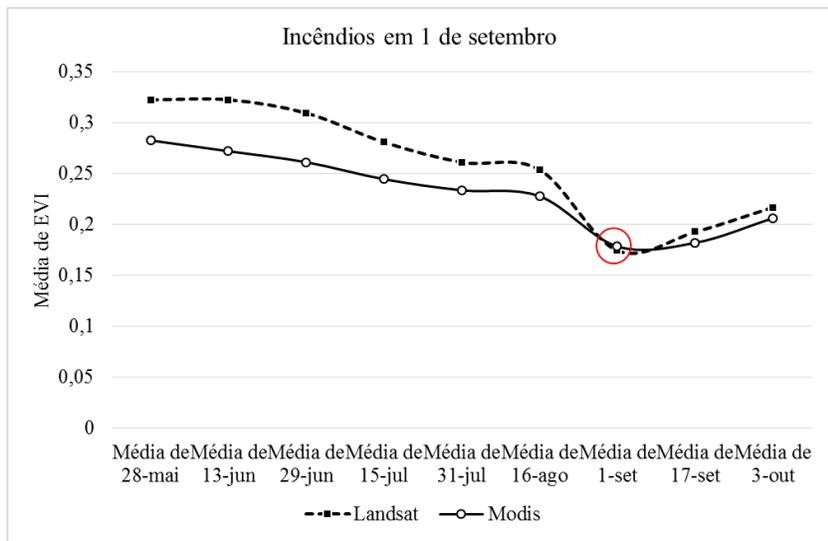


Figura 8 – Resposta das médias de EVI dos sensores LANDSAT8 e MODIS exclusivamente para os focos de calor do dia 1 de setembro de 2014.

Isolando e analisando a ocorrência dos focos de calor em períodos de maiores variações sazonais, foi possível notar que temporalmente o comportamento da vegetação é decrescente nos dois sensores e ocorre uma defasagem do período das chuvas para o período mais seco. Entretanto, a resposta no padrão de EVI observado na Figura 8 é similar ao observado no ano de 2014, quando os incêndios ocorrem no início e meio da estação seca, mantendo os níveis de EVI baixos até o início das chuvas (figura 9) e os incêndios que são mais próximos da estação chuvosa respondem melhor a recomposição do índice de vegetação.

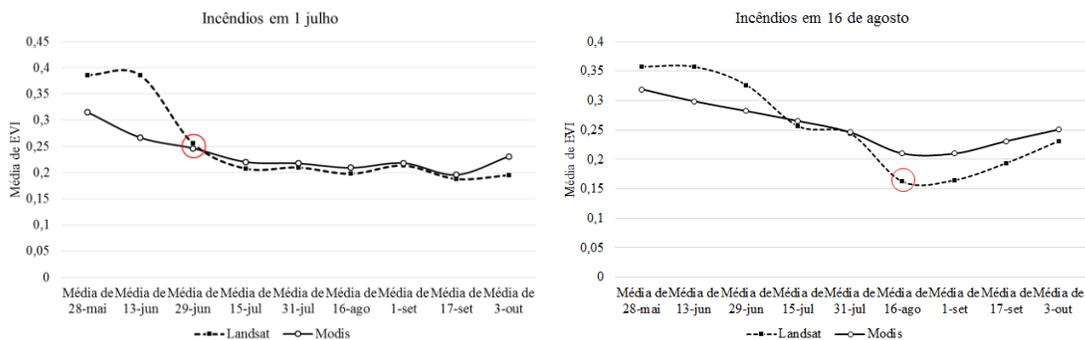


Figura 9 – Resposta das médias de EVI dos sensores LANDSAT8 e MODIS exclusivamente para os focos de calor para períodos e estações distintas.

4.3. RESPOSTA DO EVI MOD13Q1 APÓS OS INCÊNDIOS FLORESTAIS NO BIOMA CERRADO PARA A SERIE TEMPORAL 2001-2013

O perfil temporal dos Clusters de EVI do produto MOD13Q1 acompanhou o desenvolvimento fenológico da vegetação do bioma Cerrado (Figura 10). Um agrupamento pode ser observado no período de seca (maio a setembro), isto é, a vegetação apresenta estado de solo exposto e vegetação baixa, e o EVI apresentou valores médios baixos. Os valores de EVI aumentaram em outubro e novembro, quando a vegetação passa por uma transição e apresenta um estado de recuperação do déficit hídrico.

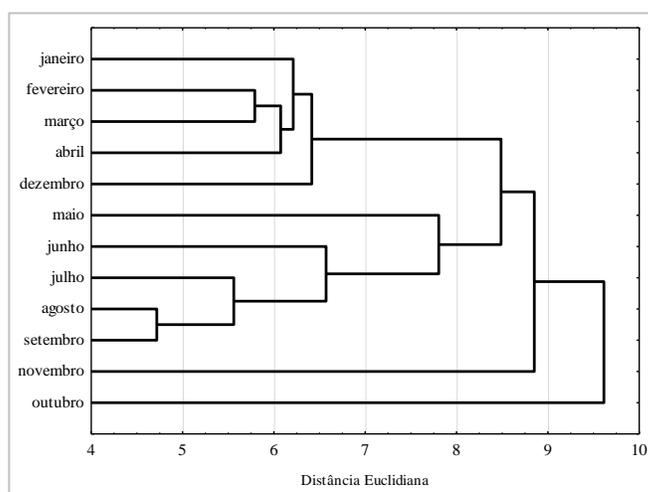


Figura 10 – Dendrograma do processo de agrupamento hierárquico por distância euclidiana dos valores médios de EVI para as variáveis mensais

A tabela 3 sintetiza os valores de EVI para as amostras na região estudada. O desenho experimental pareado foi utilizado para o estudo. Portanto, as mesmas métricas apresentadas na tabela 3 foram repetidas na amostragem da vegetação nativa, utilizada como testemunha neste estudo.

Tabela 3 - Características gerais das médias de EVI para as tipologias de vegetação.

Vegetação*	N.	%	Média EVI	Vegetação*	N.	%	Média EVI
Aa	6	0,01	0,3611	Sd	4428	10,64	0,37002
As	227	0,55	0,39093	Sgf	1756	4,22	0,37415
Cb	3	0,01	0,3734	Sgs	875	2,10	0,36792
Cm	148	0,36	0,36554	Spf	7418	17,82	0,36686
Cs	830	1,99	0,36189	Sps	3243	7,79	0,37505
Da	18	0,04	0,3706	Taf	69	0,17	0,35672
Ds	17	0,04	0,3485	Tas	387	0,93	0,36135
Fa	2211	5,31	0,36671	Td	22	0,05	0,3499
Fb	15	0,04	0,3205	Tgs	61	0,15	0,33437
Fm	101	0,24	0,36142	Tpf	6	0,01	0,3428
Fs	2895	6,96	0,36669	Tps	80	0,19	0,35755
Mm	6	0,01	0,3564	Vs	2148	5,16	0,36299
Pa	77	0,19	0,35625	Total	41623	100,00	
Pf	9	0,02	0,3425				
Pm	389	0,93	0,32756				
R	42	0,10	0,3502				
Saf	7721	18,55	0,37062				
Sas	6415	15,41	0,37353				

(Aa) Floresta Ombrófila Aberta Vegetação Secundária e Atividades Agrícolas;(As) Floresta Ombrófila Aberta Submontana;(Cb) Floresta Estacional Decidual Terras Baixas;(Cm) Floresta Estacional Decidual Montana;(Cs) Floresta Estacional Decidual Submontana;(Da) Floresta Ombrófila Densa Aluvial;(Ds) Floresta Ombrófila Densa Submontana;(Fa) Floresta Estacional Semidecidual Aluvial;(Fb) Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas;(Fm) Floresta Estacional Semidecidual das Montana;(Fs) Floresta Estacional Semidecidual Submontana;(Mm) Floresta Ombrófila Mista Montana;(Pa) Floresta Pioneira com influência fluvial e/ou lacustre;(Pf) Floresta Formações Pioneiras Vegetação com Influência Fluviomarinha (Manguesais;(Pm) Floresta Pioneira com influência marinha;(Saf) Savana Arborizada com floresta-de-galeria;(Sas) Savana Arborizada sem floresta-de-galeria;(R) Floresta Ecológico;(R) Reflorestamento;(Sd) Savana Florestada;(Sgs) Savana Gramíneo-Lenhosa sem floresta-de-galeria;(Spf) Savana Parque com floresta-de-galeria;(Sps) Savana Parque sem floresta-de-galeria;(Sgf) Savana Gramíneo-Lenhosa com floresta-de-galeria;(Taf) Savana-Estépica Arborizada com floresta-de-galeria;(Tas) Savana-Estépica Arborizada sem floresta-de-galeria;(Td) Savana-Estépica Florestada;(Tgs) Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa sem floresta-de-galeria;(Tpf) Savana Estépica Parque;(Tps) Savana-Estépica Parque sem floresta-de-galeria;(Vs) Antr. Vegetação Secundária.

Os testes de distribuição dos dados indicaram o não atendimento das condições de normalidade. Assim, adicionalmente, foi utilizado o teste não paramétrico de igualdade Mediana (Mood), para testar a diferença dos efeitos da queimada na população qualificada pelo período de seca (maio a setembro) e pelo período de chuva

(outubro a abril), o que implica na hipótese de que não há uma distribuição específica para a população.

O teste de igualdade de mediana fornece uma alternativa para a análise habitual unidirecional da variância. Os resultados da aplicação do teste de igualdade de mediana para o período de seca e chuva resulta no enquadramento de amostras como estando abaixo ou acima da média global, analogamente é feito um teste do qui-quadrado para associação realizada. O valor encontrado do qui- quadrado para período seco (Tabela 4) foi de 11,41 com um valor - p = 0,001, indica que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de que existe igualdade entre amostras que queimaram e amostram que não queimaram no período seco.

Tabela 4 - resultado do Teste de igualdade de mediana das médias de EVI (2001/2013) para o período de seca para as amostras individuais com e sem incêndios.

Queima	N≤	N>	Mediana	Q3-Q1	-+-----+-----+-----+-----
Não queimou	13530	13199	0,30479	0,09366	(-----*-----)
Queimou	7282	7612	0,30826	0,09992	(-----*-----)
					-+-----+-----+-----+-----
					0,3040 0,3056 0,3072 0,3088
Chi-quadrado = 11,41	GI = 1	P = 0,001			
Mediana global = 0,30604					
95,0% ic para mediana (não queimou) - mediana(queimou): (-0,00508;-0,00142)					

Para o período chuvoso (Tabela 5), foi encontrado do qui- quadrado de 0,22 com um valor - p = 0,635, isso indica que existe igualdade entre amostras que queimaram e amostram que não queimaram no período chuvoso ao nível de significância de 0,05. Para cada uma das tabelas é mostrada a mediana, o intervalo interquartil, e um intervalo de confiança representado por um sinal para a mediana da população.

Tabela 5 - resultado do Teste de igualdade de mediana das médias de EVI (2001/2013) para o período de seca para as amostras individuais com e sem incêndios.

Queima	N≤	N>	Mediana	Q3-Q1	-----+-----+-----+-----
Não queimou	13388	13341	0,40564	0,11026	(-----*-----)
Queimou	7424	7470	0,40621	0,10546	(-----*-----)
					-----+-----+-----+-----
					0,4050 0,4060 0,4070 0,4080
Chi-quadrado = 0,22	GI = 1	P = 0,635			
Mediana global = 0,40590					
95,0% ic para mediana (não queimou) - mediana(queimou): (-0,00277;0,00183)					

A Tabela- 6 apresenta os valores de correlação de Pearson para cada período antes e pós queima analisado. O coeficiente de correlação de Pearson mostrou que antes da véspera da queimada houve uma defasagem no valor do EVI, ou seja, os valores antes da véspera gradativamente se reduzem. A análise de correlação mostrou ainda que EVI apresenta após a queima uma defasagem de valor, isto significa que os valores EVI vão alterar, constantemente após a ocorrência de uma queimada. Resultados divergentes são encontrados se for observado isoladamente a estação seca.

Tabela 6 - resultados da correlação de Pearson para as amostras individuais com queimada das médias de EVI (2001/2013).

(médias de EVI)	Véspera	16 dias depois	32 dias depois	48 dias depois
48 dias antes	0,673	0,590	0,505	0,416
32 dias antes	0,691	0,611	0,526	0,429
16 dias antes	0,735	0,645	0,541	0,445
Véspera	1,000	0,691	0,555	0,447

Observando somente as amostras de EVI com áreas queimadas (Figura 11), observa-se que na estação chuvosa, após as queimadas, o EVI tende estar em ascensão, os valores de 48,32,16 dias depois das queimadas permanecem acima dos valores de 48,32,16 dias anteriores. O fato é esperado, pois a intensidade da atividade fotossintética da vegetação esta intrinsecamente ligado a precipitação (FONTANA et al. 2005). Portanto, nota-se que quanto mais as queimadas são antecipadas na estação seca, maior é o tempo que a vegetação necessita para recuperar o seu vigor, ao oposto das queimadas que tem ocorrência na transição entre estações (setembro/outubro) onde a recuperação é mais rápida.

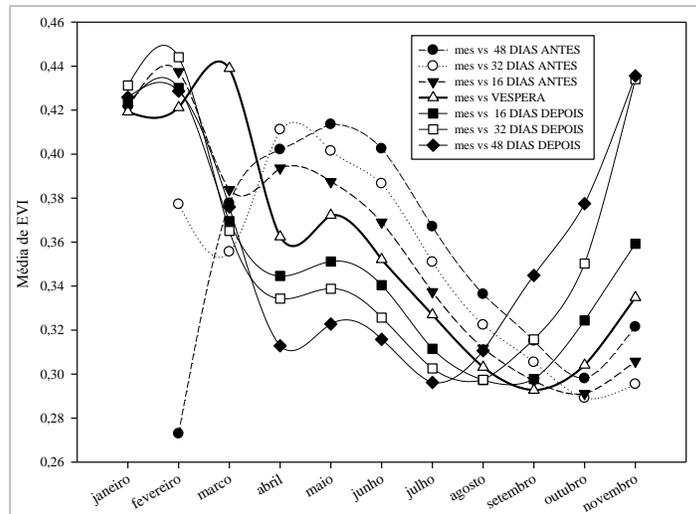


Figura 11 – Valores médios de EVI, antes e após de 48,32,16 dias da véspera da queimada, onde a véspera é o indicativo de contagem para referência do mês.

A realização do teste de diferença de médias na Tabela 7 demonstra que a média das amostras com fogo é menor do que as amostras sem fogo ao nível de significância de 0,05. A quantificação da incerteza associada com a estimativa da diferença entre as médias de dados das amostras a 95 % de confiança é de que a verdadeira diferença entre -0,0040830 e -0,0014095 a 95 % de confiança é menos do que -0,0027463. O teste t indicou ainda que as médias das amostras com fogo e sem fogo são significativamente diferentes ao nível de significância de 0,05.

Tabela 7 - Resultado do Teste t para as amostras individuais das médias de EVI (2001/2013) e Diferença entre amostras.

ESTATÍSTICA	AMOSTRAS SEM FOGO	AMOSTRAS COM FOGO
Nº DE AMOSTRAS	26729	14894
MÉDIA EVI	0,36812	0,37087
95% IC	(0,3673; 0,3689)	(0,36981; 0,37193)
DESVIO PADRÃO	0,06773	0,06611
DIFERENÇA ENTRE AMOSTRAS	-0,0027463	
95% IC	(-0,0040830; -0,0014095)	

Após a passagem do fogo sobre a vegetação (Figura 12), há uma queda acentuada nos índices de vegetação em alguns meses do ano, em outros, a recuperação é muito rápida. Nota-se claramente que nos meses de seca a vegetação responde aos

incêndios de maneira decrescente já nos meses de chuva há uma inversão que torna o efeito do fogo potencializador de um ganho no índice de vegetação. Entretanto, não se pode associar o ganho de EVI a manutenção da vegetação original, certamente o fogo provoca mudanças na comunidade de espécies bem como propicia a entrada de espécies colonizadoras em ambientes naturais.

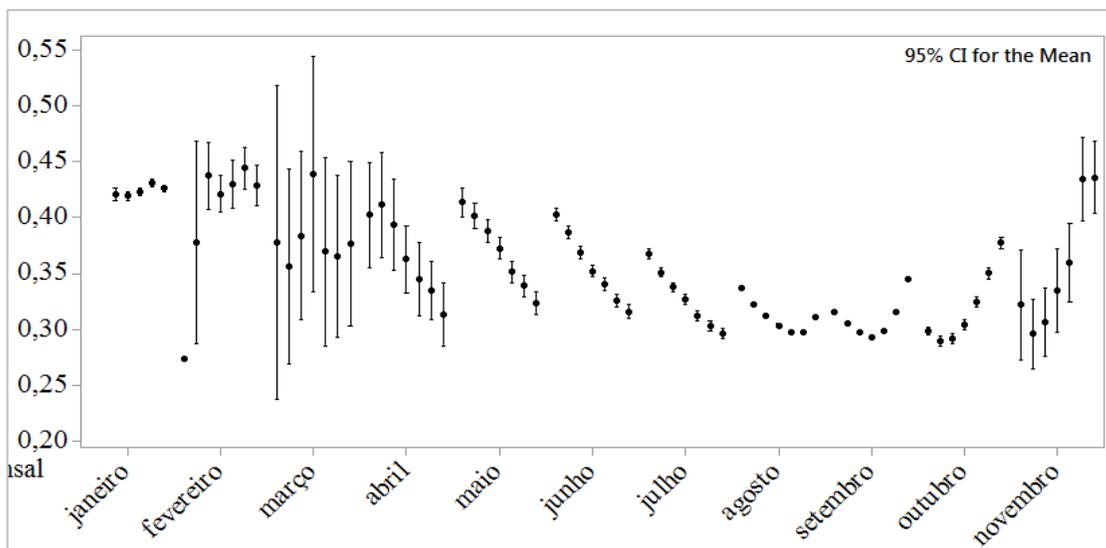
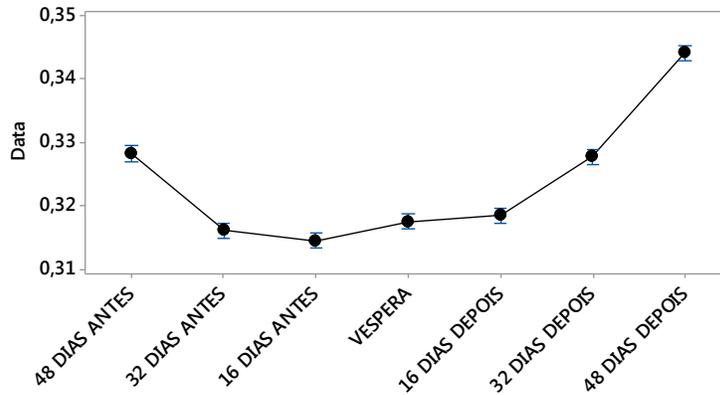


Figura 12 –Variação sazonal da média das amostras com incêndios florestais para o intervalo da véspera e de 48,32,16 dias antes e após a queima.

Na Figura 13 fica mais evidente que após a ocorrência do fogo a recuperação dos índices de vegetação aos valores pré-fogo pode superar os índices das áreas de referência. Isso ocorre devido a maior disponibilização de nutrientes nas camadas mais superficiais do solo devido à mineralização rápida da matéria orgânica com a passagem do fogo, os nutrientes mais abundantes são potássio e fósforo (COUTINHO, 1990). Esses nutrientes ficam mais acessíveis às gramíneas que apresenta alta taxa fotossintética



The pooled standard deviation was used to calculate the intervals.

Figura 13- Média geral de 2001 a 2013 das amostras com incêndios florestais para o intervalo da véspera e de 48,32,16 dias antes e após a queima.

A diferença do padrão sazonal do EVI nas tipologias de vegetação do bioma Cerrado é observada através do comportamento temporal do EVI no agrupamento dos períodos de chuva e seca, a vegetação apresenta valores de EVI oscilantes em cada uma das estações (Figura 14). A defasagem no bioma é visível devido ao regime pluviométrico e a ocorrência das queimadas não é restrita somente a estação seca. Neste sentido, foi avaliado a variabilidade espacial da precipitação a partir de dados do *Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM*, e sua relação com os padrões espaciais representados pela cobertura vegetal dos remanescentes naturais do bioma Cerrado.

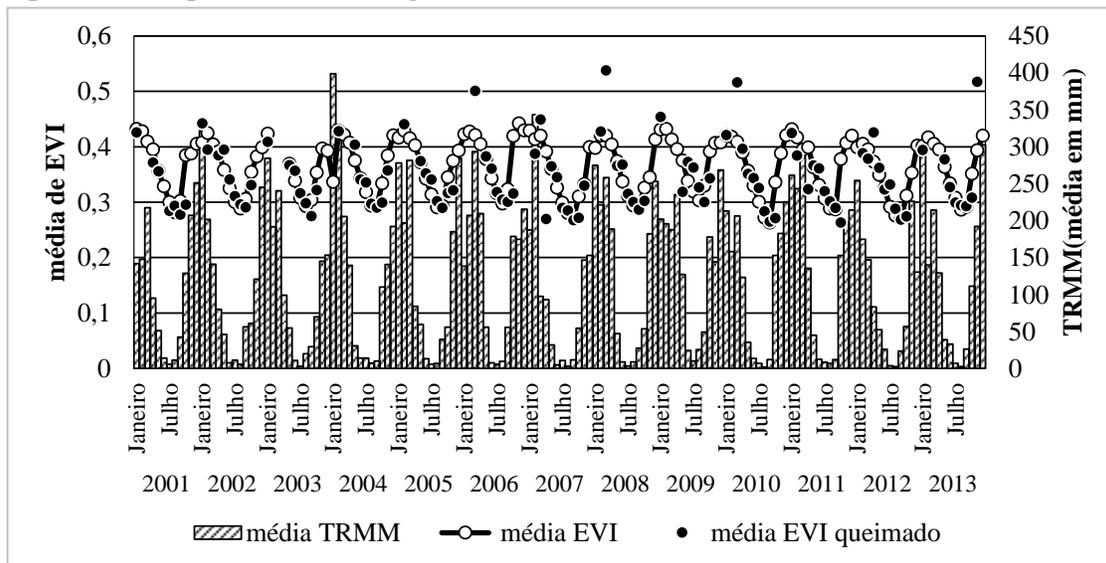


Figura 14- dados mensais da precipitação, EVI e média de EVI na véspera da queimada nos remanescentes de vegetação natural incidente no bioma Cerrado.

A Figura 15 apresenta as médias de EVI anuais para os períodos anteriores e pós queimada. Nota-se que o maior número de queimadas ocorreu nos anos de 2007, 2010 e 2012, o que causa uma depressão nos valores de EVI, entretanto, os valores médios anuais do índice de vegetação apresentam maior escala quando observados 48 dias após a queima, o mesmo ocorreu de maneira geral para os demais períodos pós queima, o qual os valores permaneceram acima da véspera da queimada, isto indica que no calendário anual o vigor da vegetação pós fogo tem um ganho. A oscilação de valores entre os anos indica que o período de restabelecimento dos padrões de vigor da vegetação transita entre um e dois anos, observa-se que no período de 2007 a 2009 as amostras indicaram que existiu uma redução no quantitativo de queimadas e que essa diminuição elevou os os valores de EVI.

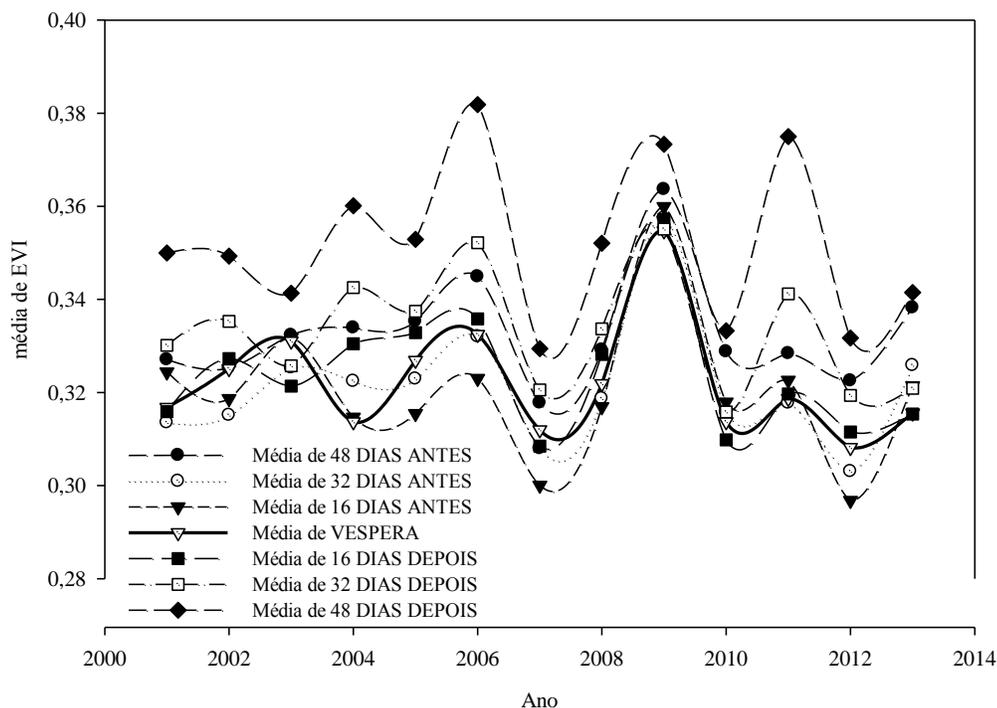


Figura 15- valores médios anuais de EVI das amostras com queimada para o período antes e pós fogo.

Nestas análises foram utilizados métodos para a realização de avaliações distintas, demonstrando aplicações diferenciadas do sensoriamento remoto da vegetação a partir dos sensores LANDSAT e MODIS. No entanto, estudos baseados nas

propriedades espectrais da vegetação detêm uma infinidade de aplicações (ASNER, 1998; PONZONI e SHIMABUKURO, 2010). Estudos recentes vêm utilizando o sensoriamento remoto da vegetação como indicador para questões relacionadas a seca da Amazônia (ANDERSON et al, 2010), a fenologia da vegetação (KOLTUNOV et al., 2009), a biomassa (SAATCHI et al., 2011), a produção de soja (GALFORD et al., 2008; BROWN et al., 2013) e para a detecção de exploração seletiva (ASNER et al., 2005). Inúmeras são as aplicações relacionadas aos fundamentos do comportamento espectral da vegetação tropical para a compreensão de processos em diversas escalas e áreas do conhecimento, fazendo do sensoriamento remoto da vegetação tropical um desafio bastante intrigante.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo realizado no Cerrado, foram usadas amostras para a parametrização das mudanças na resposta da vegetação através do índice de vegetação melhorado (EVI). As mudanças nas médias verificadas antes e após os incêndios florestais foram demonstradas para o bioma e para as diferentes tipologias de vegetação estudadas. A variabilidade da resposta espectral ao longo das regiões estudadas foi interpretada em relação aos ciclos sazonais de precipitação. Conclui-se que os efeitos dos incêndios florestais podem variar de acordo com diversos fatores. Entretanto, dentro das variáveis estudadas neste trabalho, a precipitação teve um fator preponderante na recuperação do vigor da vegetação.

As análises demonstraram que o EVI é capaz de detectar a diferença sazonal do vigor da vegetação entre os meses, entre as estações seca e chuvosa e entre a vegetação queimada e não queimada. Dentre as áreas impactadas pelos incêndios florestais, a vegetação tende a ter melhor recuperação quando estes eventos ocorrem no fim da estação seca e no início da estação chuvosa, a recuperação do vigor da vegetação de eventos ocorridos no início da estação seca podem ser superiores a 180 dias (6meses). No entanto para eventos ocorrido no fim da estação seca (setembro/outubro), em 48 dias os valores de EVI podem ser superiores 21% aos da véspera dos incêndios . O vigor da

vegetação não é alterado significativamente quando os incêndios ocorrem na estação chuvosa, entretanto os efeitos no início da estação seca, reduzem o vigor da vegetação até o início da estação chuvosa.

Não obstante foi possível averiguar que as ocorrências de eventos mais extremos dentro da série estudada ocorreram nos anos de 2007,2010 e 2012 e que quando observada a diferença no EVI (Figura 17), a oscilação de valores entre os anos indica que o período de restabelecimento dos padrões de vigor da vegetação transita entre um e dois anos. Notou-se também que dentro da série observada existe não só um encurtamento temporal na ocorrência dos eventos extremos de incêndios florestais como também um achatamento e declínio da recuperação dos valores médios de EVI.

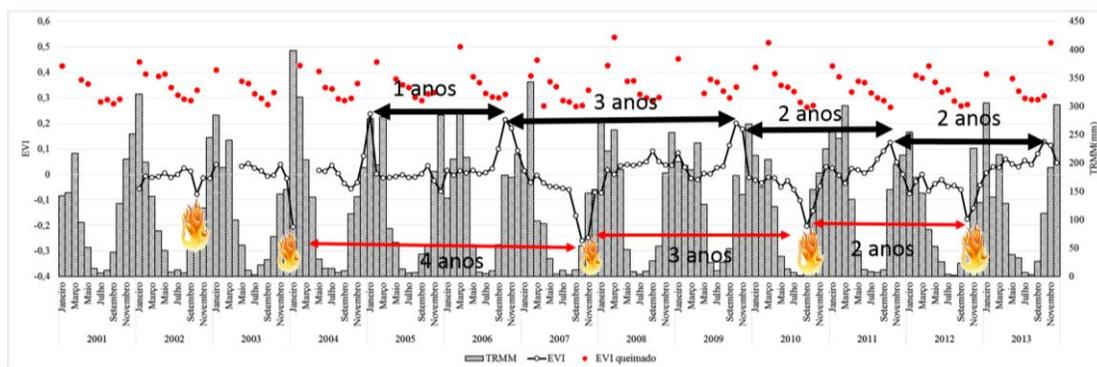


Figura 16- variação relativa de EVI para série 2001-2013.

Em sùmula a vegetação sofre um incremento de 33% nos valores de EVI do período seco para o chuvoso, os incêndios florestais provocam um decréscimo de 2% nos valores médios de EVI para o bioma Cerrado. Incêndios na estação seca resultam em uma variação negativa de 2% no vigor da vegetação. Já para a estação chuvosa a variação não é significativa e é menor que 1%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, M. Spatial analysis of two-species interactions. *Oecologia*, Berlin, Springer-Verlag, vol. 91, p. 134-140. 1992.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, vol. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.
- ANDRAE, M. Biomass burning: its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. (ed.). *Global biomass burning: atmospheric, climatic and biospheric implications*. Cambridge: MIT, p. 3-21. 1991.
- ASNER, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, n. 64, p. 234-253, 1998.
- ASNER, G. P, KNAPP, D. E., BROADBENT, E. N., OLIVEIRA, P. J., KELLER, M., & SILVA, J. N.. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, v. 310, n. 5747, p. 480-482, 2005.
- BATISTA, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para o planejamento de controle de incêndios florestais. *Floresta* 30 (1/2): 45- 54. 2000.
- BATLLE-BAYER, L. BATJES, N.H., BINDRABAN, P.S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n.137, p. 47-58, 2010.
- BERNOUX, M., CERRI, C.C., CERRI, C.E.P., NETO, M.S., METAY, A., PERRIN, A.-S., SCOPEL, E., RAZAFIMBELO, T., BLAVET, D., PICCOLO, M.D.C., PAVEL, M., MILNE, E. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development*, n.26, p. 1–8, 2006.
- BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20:387-394. 2005.
- BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L. Global assessment of the temporal reporting accuracy and precision of the MODIS burned area product. *Int. J. of Wildland Fire*, vol. 19, p. 705-709, 2010.
- BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A. A; HUMBER, M. MODIS Collection 5.1 Burned Area Product - MCD45. User’s Guide. Version 3.0.1. 2013.
- BOWMAN, D. M.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth system. *Science*, vol. 324, p. 481-484. 2009.
- BRASIL. Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado – PPCerrado. (2011) Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 200p. http://www.mma.gov.br/estruturas/201/arquivos/ppcerrado_201.pdf (Acessado em 13 de junho de 2014).

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2007. Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado – Relatório Final. MMA, Brasília. <http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documentos/relatorio_final.pdf> (Acessado em 13 de janeiro de 2014).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2009. Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no bioma Cerrado, 2002–2008: dados revisados. MMA, Brasília. <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_monitoramento_desmate_bioma_cerrado_csr_ibama_2002_2008_rev_72.pdf> (Acessado em 11 de julho de 2014).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2013. Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB. Agência Nacional de Águas – ANA. <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> (Acessado em 11 de novembro de 2012).
- BRIDGEWATER, S., RATTER, J.A., RIBEIRO, J.F. Biogeographic patterns, β -diversity and dominance in the cerrado biome of Brazil. *Biodiversity and Conservation*, V. 13, p. 2295-2318, 2004.
- BROWN, J.C., KASTENS, J.H., COUTINHO, A.C., VICTORIA, D.C., BISHOP, C.R. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, n. 130, p. 39-50, 2013.
- BUTLER, A., MEIR, P., SAIZ, G., MARACAHIPES, L., MARIMON, B.S., GRACE, J. Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. *Plant Soil*, n. 352, p.129–142, 2012.
- COCHRANE, Mark A. Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in evergreen tropical forests. *Conservation Biology*, v. 15, n. 6, p. 1515-1521, 2001.
- COUTINHO, L. M. As queimadas e seu papel ecológico. *Brasil Florestal*, v. 10, n. 44, p. 7-23. 1980.
- COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. *Acta bot. bras.*, vol. 20, n. 1, p. 13-23, 2006.
- DANTAS, V. d. L., BATALHA, M.A., PAUSAS, J. G. Fire drives functional thresholds on the savanna–forest transition. *Ecology*, v. 94, p.2454–2463, 2013.
- DANTAS, V. d. L., PAUSAS, J. G. The lanky and the corky: fire-escape strategies in savanna woody species. *Journal of Ecology*, v. 101, p.1265–1272, 2013.
- DE CASTRO, E.A., KAUFFMAN, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, n.14, p.263–283, 1998.
- EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, n. 38, p. 201-341. 1972.
- EITEN, G. Brazilian savannas. In: HUNTLEY, B. J; WALKER, B. H. (eds). *Ecology of tropical savannas*. Berlin, Springer-Verlag, p. 25-47. 1982.
- EVA, H.D., BELWARD, A. S., MIRANDA, E.E., DI BELLA, C.M., GOND, V., HUBER, O., JONES, S., SGRENZAROLI, M., FRITZ, S. 2004. A land cover map of South America. *Global Change Biology*, v. 10, p. 731-744.
- FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). IPEF–ESALQ. Universidade de São Paulo. *Scientia Forestalis*, n. 53, p. 39- 48. 1998.

- FERREIRA, L.G., YOSHIOKA, H., HUETE, A., SANO, E.E. Seasonal landscape and spectral vegetation dynamics in the Brazilian Cerrado: an analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). *Remote Sensing of Environment*, n.87, p.534-550, 2003.
- FERREIRA, L. G., HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, n. 25, p. 1837–1860, 2004.
- FONTANA, D.C.; POTGIETER, A.; APAN, A. Relação entre a precipitação pluvial e índice de vegetação em imagens multitemporais MODIS. In XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (CBAGRO), Proceedings, Campinas, Brazil. 2005
- FOODY, G.M., Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: An example focused on the NDVI-rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*, n.88, p. 283–293, 2003.
- FREIRE Jr, G.B., MOTTA, P. C. Effects of experimental fire regimes on the abundance and diversity of cursorial arachnids of Brazilian savannah (cerrado biome). *Journal of Arachnology*, v. 39, p. 263-272, 2011.
- FRIZZO, T. L. M.; BONIZÁRIO, C.; BORGES, M. P.; VASCONCELOS, H. L. Revisão dos Efeitos do Fogo Sobre a Fauna de Formações Savânicas do Brasil. *Oecologia Australis*, vol. 15, p. 365-379, 2011.
- FURLEY, P.A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. *Global Ecology and Biogeography*, n. 8, p. 223–241, 1999.
- GALFORD, G. L., MUSTARD, J. F., MELILLO, J., GENDRIN, A., CERRI, C. C., & CERRI, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, n.112, p. 576–587, 2008.
- GIAMBELLUCA, T.W., SCHOLZ, F.G., BUCCI, S.J., MEINZER, F.C., GOLDSTEIN, G., HOFFMANN, W.A., FRANCO, A.C., BUCHERT, M.P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agriculture and Forest Meteorology*, n.149, p.1365–1376, 2009.
- GIGLIO, L.; DESCLOITRES, J.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, p. 273-283, 2003.
- GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D. P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, p. 408-420, 2009.
- GONTIJO, G. A. B.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, E. D. S.; JÚNIOR, F. W. A. Detecção de queimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais... São José dos campos: INPE, 2011. p. 7966-7973. Disponível na biblioteca digital URLib: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1587.pdf>>. Acesso em: 17 outubro de 2014.
- GOTTSBERGER, G.; SILBERBAUER-GOTTSBERGER, I. 2006. Life in the Cerrado: A South American Tropical Seasonal Vegetation. Vol. II. Pollination and Seed Dispersal. Ulm: Reta Verlag, 384 p. 2006.

- GRÉGOIRE, J. M.; EVA, H. D.; BELWARD, A. S.; PALUMBO, I.; SIMONETTI, D.; BRINK, A. Effect of land-cover change on Africa's burnt area. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 22, p. 107-120, 2013.
- GRÉGOIRE, J. M.; TANSEY, K.; SILVA, J. M. N. The GBA2000 initiative: developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *International Journal Remote Sensing*, vol. 24, n. 6, p. 1369 – 1376, 2003.
- HARDESTY, J., MYERS, R., FULKS, W. FIRE, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum*. v. 22, p. 78-87, 2005.
- HASSAN, QUAZI K.; BOURQUE, CHARLES P.; MENG, FAN-RUI. Application of Landsat-7 ETM+ and MODIS products in mapping seasonal accumulation of growing degree days at an enhanced resolution. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 1, n. 1, p. 013539-013539-10, 2007.
- HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES, JARVIS, J. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 25, p. 1965-1978, 2005.
- HILL, M.J., ROMÁN, M.O., SCHAAF, C.B, HUTLEY, L. BRANNSTROM, C., ETTER, A., HANAN, N.P. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sensing of Environment*, n. 115, p. 2008-2024. 2011.
- HOFFMANN, William A. Post-burn reproduction of woody plants in a neotropical savanna: the relative importance of sexual and vegetative reproduction. *Journal of Applied Ecology*, v. 35, n. 3, p. 422-433, 1998.
- HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; BRUCE, J.; LEE, H.; CALLANDER, B. A.; HAITES, E.; HARRIS, N.; MASKELL, K. *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1995.
- HUETE, A, LIU, H. Q., BATCHILY, K., LEWEEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, n. 59, p. 440–451, 1997.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, n. 83, p. 195-213, 2002.
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>> Acesso em: 14 de setembro de 2014.
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/perguntas-frequentes/incendios-florestais>> Acesso em: 4 de novembro de 2014.
- IBGE. *Mapa de Biomas do Brasil; primeira aproximação*. Rio de Janeiro: IBGE. 2004.
- IBGE. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2ª Edição*. Rio de Janeiro: IBGE. 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/biomas>> Acesso em: 20 de Agosto de 2014.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em: 19 de Agosto de 2014.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5.000.000. <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>> (Acessado em 15 de dezembro de 2014).
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/>> Acesso em: 12 de setembro de 2014.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>> Acesso em: 12 de outubro de 2014.
- ICHII, K., KAWABATA, A., YAMAGUCHI, Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990. *International Journal of Remote Sensing*, n. 23, p. 3873–3878, 2002.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598p.
- JEPSON, W. A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in the Brazilian savanna. *The Geographical Journal*, v. 171, n. 2, p. 99-111, 2005.
- JEPSON, W., BRANNSTROM, C., FILIPPI, A. Access Regimes and Regional Land Change in the Brazilian Cerrado, 1972–2002. *Annals of the Association of American Geographers*, n. 100, pp. 87–111, 2010.
- JUSTICE, C O.; VERMOTE, E., TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D.K, SALOMONSON, V .; PRIVETTE, J.L.; RIGGS, G .; STRAHLER, A.; LUCHT , W .; MYNENI, R. B; KNYAZIKHIN, Y .; RUNNING , S. W.; NEMANI, R. R.; W AN, Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.
- JUSTICE, C. O., TOWNSHEND, J. R. G., VERMOTE, E. F., MASUOKA, E., WOLFE, R. E., SALEOUS, N., ROY , D. P ., MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sens. Environment*, vol. 83, p. 3–15. 2002a.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. (2002b). The MODIS fire products. *Remote Sens. Environ.* vol. 83, p. 244-262, 2002b.
- KAUFFMAN, J. B. CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. *Journal of Ecology*, vol. 82, p. 519-531, 1994.
- KAUFMAN, Y. J.; KLEIDMAN, R.; KING, M. D.; WARD, D. E. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*. vol. 103, n. D24, 1998.
- KAUFMAN, Y. J.; ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S; CHU, D. A.; HAO, W. M.; LI, R, -R.; JUSTICE, C. O. Fire and smoke observed from the Earth Observing

- System MODIS instrument – products, validation, and operational use. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, n. 8, p. 1765-1781, 2003.
- KOLTUNOV, Alexander et al. Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 11, p. 2431-2440, 2009.
- LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURU, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. *Espaço & Geografia*, v. 6, n. 1, p. 91-121. 2003.
- LIESENBERG, V., GALVÃO, L.S., PONZONI, F.J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. *Remote Sensing of Environment*, n.107, p. 276-286, 2007.
- MATRICARDI, Eraldo AT et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 5, p. 1117-1129, 2010.
- MEDEIROS, M. B.; MIRANDA, H. S. Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três incêndios Florestais prescritas anuais. *Acta Botânica Brasilica*, v.19, n.3, p.493-500, 2005.
- MENDES, I.C., FERNANDES, M.F., CHAER, G.M., JUNIOR, F.B.R. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. *Plant Soil*, n. 359, p. 183-195. 2012.
- MIETTINEN, J. Burnt area in insular Southeast Asia using medium resolution satellite imagery. *Dissertationes Forestales* 45. 45p. 2007.
- MIRANDA, H.S.; Bustamante, M.M.C.; MIRANDA A.C. The fire factor, p. 51-68. In: Oliveira, P.S.& Marquis, R.J. (orgs.). *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna*. Columbia University Press. 424p. 2002.
- MIRANDA, H. S. NETE, N. W., NEVES, B. M. C. Caracterização das queimadas de Cerrado. In: MIRANDA, H. S. *Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: resultados do Projeto Fogo*. IBAMA/MMA, Brasília. 144p. 2010.
- MIRANDA, H. S.; SATO, M. N. Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado. In: SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. (org.). *Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2005. 439p.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>> Acesso em: 03 de agosto de 2014.
- MODIS Website. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>> Acesso em: 12 de setembro de 2014.
- MODIS Website. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table> Acesso em: 14 de setembro de 2014.
- MYERS, N., MITTERMEIER, R.A., MITTERMEIER, C.G., FONSECA, G.A.B., Kent, J., Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, n. 403, p. 853-858. 2000.

- NARDOTO, G. B., BUSTAMANTE, M. M. D. C. Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in savannas of Central Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, p. 955-962, 2003.
- NUNES, J. R. S. FMA+ - Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná – Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.
- NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W. J. landscape units of the Pantanal: structure, function, and human use. In: JUNK, W. J. NUNES DA CUNHA, C.; WANTZEN, K. M. (eds): *Ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland*. p. 127 – 141. 2009.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T., AND J. A. RATTER. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In: Oliveira, P.S., Marquis, R.J. (eds) *The cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna*, p.91–120. New York: Columbia University Press. 2002.
- OLIVEIRA, A. L. S. Avaliação dos sensores EOS/MODIS e NOAA/AVHRR na detecção e registro de incêndios e queimadas. Dissertação de mestrado. Viçosa: UFV, 2006.
- PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 38, n. 1, p. 77-84, 2008.
- PHILIPPI, A. M., BRANNSTROM, C., DOBREVA, I., CAIRNS, D. M., KIM, D. Unsupervised fuzzy ARTMAOP classification of hyperspectral Hyperion data for savanna and agriculture discrimination in the Brazilian cerrado. *GIScience & Remote Sensing*, n.46, p.1–23, 2009.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. A imagem como fonte de dados radiométricos (abordagem quantitativa). PONZONI, FJ, SHIMABUKURO, YE *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos: PARÊNTESE, p. 68-102, 2010.
- RADA, N. Assessing Brazil’s Cerrado agricultural miracle. *Food Policy*, n. 38, p.146–155, 2013.
- RATANA, P., HUETE, A. R., & FERREIRA, L. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal–temporal domain. *Earth Interactions*, n. 9, p.1–22, 2005.
- RIBEIRO, S.C., FEHRMANN, SOARES, P.B.S., JACOVINE, L.A.G., KLEIN, C., GASPAR, R.O. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, n.262, p.491-499, 2011.
- RIBEIRO, J.F.; WALTER, T.M.B. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S.M; ALMEIDA, S.P. (Ed.). *Cerrado: Ambiente e Flora*. Brasília: Embrapa, p.89-152, 1998.
- HUETE, A.R. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images. *Remote Sensing of Environment*, v.59, n.3, p.440-451, 1997.
- RIVEIRA-LOMBARDI, R. J. Estimativa de áreas queimadas com produtos MODIS como subsídio à estimativa de emissão de gases de efeito estufa pela queima de biomassa na Amazônia e Cerrado brasileiros. Tese de Doutorado. INPE, São José dos Campos, 188 p. 2009.

- ROY, D. P.; LEWIS, P.; JUSTICE, C. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data – a bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, p. 263 – 286, 2002.
- ROY, D. P.; JIN, Y.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, p. 137-162, 2005.
- ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; JUSTICE, C. O.; JU, J. The collection 5 MODIS burned area product – Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, p. 3690-3707, 2008.
- ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon Burned Area Products. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. vol. 47, n.4, p. 1032-1044. 2009.
- SAATCHI, S.S., HARRIS, N.L., BROWN, S., LEFSKY, M., MITCHARD, E.T.A., SALAS, W., ZUTTA, B.R., BUERMANN, W., LEWIS, S.L., HAGEN, S., PETROVA, S., WHITE, L., SILMAN, M., Morel, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 108, p. 9899-9904, 2011.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L.; FERRAZ-VICENTINI, K. R. Fire in the Cerrado 32,000 years ago. *Current Research in the Pleistocene*, v.11, p. 85-87, 1994.
- SALOMONSON, V. V.; TOLL, D. L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS moderate resolution imaging spectrometer-nadir (MODISN) facility instrument. *Advances in Space Research*, vol. 11, n.3, p. 231-236, 1991.
- SALOMONSON, V. V.; BARKER, J. L. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. 15th Annual AAS Guidance and Control Conference, Paper AAS 92-004, Keystone, CO, Feb. 8-12. 1992.
- SANO, E. E., ROSA, R., BRITO, J. L. S., FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.
- SANO, E. E., ROSA, R., BRITO, J. L., FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, p. 113-124, 2009.
- SANO, E.E., BARCELLO, A.O., BEZERRA, H.S. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. *Pasturas Tropicales*, v. 22, n.3, p. 2-15, 2001.
- SANO, E.E., SANTOS, C.C.M., SILVA, E.M., CHAVES, J.M. . Fronteira agrícola do oeste baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. *Geociências*, v. 30, p. 479-489, 2011.
- SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVERA-LOMBARDI, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Coord.). *Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil*. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 425 p. 2007.

- SHARMA, S. Applied multivariate techniques. New York: John Wiley & Sons, 1996
- SILVA, T. B., ROCHA, W. J. S. F., ANGELO, M. F. Quantificação e análise espacial dos focos de calor no Parque Nacional da Chapada Diamantina - BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos campos: INPE, 2013. p. 6969-6976. Disponível na biblioteca digital URLib: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1493.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2014.
- SILVA, J. F., FARINAS, M. R., FELFILI, J.M., KLINK, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography*, n.33, p.536–48. 2006.
- SILVA, J. M. C., BATES, J. M. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A tropical savanna hotspot. *Bioscience*, n. 52, p.225–34. 2002.
- SILVÉRIO, D.V., Brando, P.M., Balch, J.K., Putz, F.E., Nepstad, D.C., Oliveira-Santos, C., Bustamante, M.M.C. Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Phil Trans R Soc B*, v. 368: 20120427. 2013.
- SIMON, M.F., GREYER, R., QUEIROZ, L.P., SKEMA, C., PENNINGTON, R.T., HUGHES, C.E. Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 106, p. 20359-20364, 2009.
- SOARES, J. J.; SOUZA, M. H. A. O.; LIMA, M. I. S.. Sucessão vegetal após fogo ao longo de trinta anos em um cerrado, São Carlos, SP, Brasil. *Braz. J. Biol.*, São Carlos , v. 66, n. 2b, May 2006 .
- SONG, Y., MA, M. A statistical analysis of the relationship between climatic factors and the Normalized Difference Vegetation Index in China. *International Journal of Remote Sensing*, v. 32, p. 3947-3965, 2011.
- STRAHLER, A.; MUCHONEY , D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOP AL, S.; LAMBIN, E.; MOODY, A. MODIS Land Cover and Land-Cover Change products algorithm theoretical basis document (A TBD). Version 5.0, Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, May, 72p. 1999.
- TURNER, D.P., RITTS, W.D., COHEN, W.B., GOWER, S.T., RUNNING, S.W., ZHAO, M., COSTA, M.H., KIRSCHBAUM, A., Ham, J., SALESKA, S., Ahl, D.E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment* 102:282-292, 2006.
- VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., GIGLIO, L., COLLATZ, G. J., MU, M., KASIBHATLA, P. S., MORTON, D.C., DEFRIES, R.S., JIN, Y., LEEUWEN, T.T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p.11707-11735, 2010.
- VAN LANGEVELDE, F., CLAUDIUS, A.D.M., VAN VIJVER, D., KUMAR, L., KOPPEL, J.V.D., RIDDER, N.D., VAN ANDEL, J., SKIDMORE, A.K., HEARNE, J.H., STROOSNIJDER, L., BOND, W.J., PRINS, H.H.T., RIETKERK, M. Effects of fire and herbivory on the stability of savanna ecosystems. *Ecology*, v. 84, p.337-350, 2003.

- WHELAN, R. J. The ecology of fire. Cambridge University Press, Cambridge. 1995. 346p.
- ZARCO-TEJADA, P. J.; RUEDA, C. A.; USTIN, S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. Remote Sensing of Environment, vol. 85, n. 1, p. 109-124. 2003.