

DETECÇÃO DE CICATRIZES DO FOGO NA VEGETAÇÃO CERRADO DO DISTRITO FEDERAL ENTRE 1999 A 2011

*Burn Scars Detection in the Cerrado Vegetation of the
Federal District between 1999 and 2011*

**Camila Valéria de Jesus Silva¹, Olívia Bueno da Costa² &
Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi²**

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR

¹Avenida dos Astronautas 1758, Jardim da Granja, CEP 12227010 - São José dos Campos, São Paulo, Brasil
camilaflorestal@gmail.com

²Universidade de Brasília – UnB

Faculdade de Tecnologia - Engenharia Florestal

²Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70919-970, Brasília, Distrito Federal, Brasil
costa.ob@gmail.com; ematricardi@unb.br

Recebido em 23 de Novembro, 2015/ Aceito em 18 de Dezembro, 2016

Received on November 23, 2015/ Accepted on December 18, 2016

RESUMO

A vegetação do Cerrado possui adaptações ao fogo, porém, quando descontrolado, o fogo provoca grandes impactos como a liberação de gases de efeito estufa e a perda de biodiversidade. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma técnica de detecção de cicatrizes do fogo em vegetação do Cerrado e quantificar as áreas atingidas por fogo no Distrito Federal, localizado no centro-oeste do Brasil. A técnica desenvolvida envolve um processamento semiautomático combinando a Análise de Componentes Principais (ACP) e a classificação por árvore de decisão. Foram utilizadas imagens Landsat 5 TM adquiridas entre 1999 e 2011. Estas imagens foram transformadas pela ACP para um redimensionamento dos dados e remoção da correlação entre as bandas. As imagens das componentes analisadas e aquelas que mostraram maior distinção dos valores da ACP para as áreas das cicatrizes (CP1, CP2 e CP5) foram utilizadas como entrada da Árvore de Decisão. A técnica de detecção de cicatrizes de queimadas apresentou acurácia total de aproximadamente 96%, com omissão e comissão de 50% e 20%, respectivamente. O mapeamento resultante da aplicação desta técnica mostrou que a maior área afetada pelo fogo ocorreu em 2010, totalizando 293,23 km² queimados. Outros anos com grandes áreas afetadas pelo fogo incluem 2004, 2007 e 2011. Os percentuais de áreas atingidas pelo fogo no Distrito Federal dentro de Unidades de Conservação de Proteção Integral representaram 51,8% e 44,3% em 2007 e 2010, respectivamente. Algumas áreas estudadas foram atingidas até 10 vezes por fogo recorrente durante o período estudado. Estima-se que 930,57 km² foram queimados entre uma e quatro vezes no Distrito Federal. Finalmente, observou-se que os anos com as maiores áreas queimadas foram aqueles com a menor precipitação acumulada nos meses de seca, indicando uma forte relação entre ocorrência do fogo e precipitação.

Palavras Chave: Cicatrizes de Fogo, Análise de Componentes Principais, Árvore de Decisão, Cerrado, Frequência do Fogo, Landsat TM.

ABSTRACT

The *Cerrado* is a fire-adapted vegetation type although uncontrolled fire may cause several environmental impacts such as emission of greenhouse gases and biodiversity losses. This study aimed to develop a remote sensing technique to detect fire scars in the *Cerrado* vegetation and to quantify the burned areas in the Federal District, located in the central region of Brazil. It included a semi-automatic processing technique that combined Principal Component Analysis (PCA) and a decision tree classification. Landsat 5 TM images were acquired between 1999 and 2011. The Landsat scenes were initially processed by the PCA to remove data correlation among the spectral bands. The PC images were generated and reviewed and those showing greater potential to distinguish fire scars (PC1, PC2, and PC5) were used as input for the Decision tree classifier. The burned scars detection technique developed in this study showed approximately 96% of global accuracy, with 50% and 20% of Omission and Commission Errors, respectively. Based on this research results, we estimated that 293.23km² were burned in 2010. Major fire events also affected large areas in 2004, 2007, and 2011. We estimate that 51.8% and 44.3% of fire scars detected in 2007 and 2010, respectively, occurred within protected areas in the study area. Some studied areas were affected up to 10 times by recurrent fires during the studied period. We estimated that 930.57 km² was burned between one and four times in the study area. Finally, we observed that the largest burned areas tend to occur during the lowest rainfall years and in the driest months, which indicates a strong relationship between fire events and low precipitation.

Keywords: Fire Scars, Principal Component Analysis, Tree decision, *Cerrado*, Fire frequency, Landsat TM.

1. INTRODUÇÃO

As savanas tropicais têm em comum a ocorrência de grandes incêndios e se caracterizam como ecossistemas susceptíveis ou dependentes do fogo (BOND & KEELEY, 2005; LAL, 2008; PIVELLO, 2011). No caso do *Cerrado*, apesar do fogo ser um dos determinantes de sua vegetação (NASCIMENTO, 2001; HARDESTY *et al.*, 2005; PIVELLO, 2011), a rápida ocupação humana dessa região tem alterado o regime natural do fogo (estação e frequência de queimadas), gerando consequências na estrutura e composição da vegetação (MIRANDA *et al.*, 2002). A necessidade de monitoramento das queimadas e incêndios no *Cerrado* tem se tornado crítico, principalmente pela intensificação das discussões sobre a contribuição desses eventos para as emissões de CO₂ e consequente contribuição para as mudanças climáticas (IPCC, 2014).

O monitoramento e detecção de fogo no mundo, atualmente, é feita com dados de focos de calor derivados de sensores que operam na faixa do infravermelho termal, aproximadamente 10,4 a 12,5 µm. Esses sensores produzem dados com alta resolução temporal, o que permite realizar um monitoramento contínuo da ocorrência das queimadas (INPE, 2015). Entretanto, existe uma carência de dados que revelem a extensão das áreas afetadas por fogo. Quantificar a extensão dessas áreas é fundamental para iniciativas

governamentais de prevenção de queimadas e incêndios no *Cerrado*.

O fogo na maior parte das ocorrências é consequência da ação antrópica, sendo raramente um evento em decorrência de raios que precedem as chuvas (COUTINHO, 1990; PIVELLO, 2011). O fogo pode se tornar um desastre de grande escala, se espalhado por extensas áreas da vegetação do *Cerrado*, que é altamente susceptível a este evento, quando foge do controle humano. As consequências dos grandes incêndios abrangem as esferas ambientais, econômicas e sociais, tais como: perdas de biodiversidade, desestruturação e empobrecimento dos solos, despesas para supressão das chamas, prejuízos por perdas e danos de bens, e quantidades massivas de gases liberados na atmosfera que prejudicam a saúde da população (COCHRANE, 2009; PIVELLO, 2011).

Os impactos dos incêndios florestais podem ser minimizados quando a ocorrência do fogo é prevista. As previsões são derivadas da modelagem de probabilidade de ocorrência e dão suporte às forças governamentais na aplicação de medidas para combate e controle do fogo. Nesse sentido, o mapeamento das cicatrizes do fogo pode auxiliar essas medidas, já que as queimadas mapeadas servem como informação relevante de entrada para a validação de modelos preditivos (DEVISSCHER *et al.* 2016; FONSECA *et al.*, 2016).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante nos estudos sobre queimadas. Existe uma vasta gama de trabalhos que se dedicaram a desenvolver técnicas derivadas do sensoriamento remoto para o mapeamento de ocorrências e quantificação dos efeitos do fogo (PEREIRA & SETZER, 1993; FRANÇA & SETZER, 2001; ROY *et al.*, 2002; ANDERSON *et al.*, 2005; MORTON *et al.* 2011; MATRICARDI *et al.*, 2013; PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2014; ANDERSON *et al.*, 2015). Para o Cerrado, a disponibilidade e acessibilidade das imagens do satélite Landsat representam uma importante fonte de dados para estudos que se referem à espacialização temporal do fogo. A série de satélites Landsat apresenta continuidade de imageamento desde a década de 1970, gerando dados com resolução temporal e espacial adequada para o estudo do fogo. Na região por onde se estende o bioma Cerrado existe a vantagem da baixa cobertura de nuvens, o que melhora o desempenho do mapeamento em curtos períodos de tempo.

No Cerrado, devido às características da vegetação, que possui feições de dossel aberto, as cicatrizes de fogo são espectralmente mais facilmente detectáveis se comparadas às cicatrizes de fogo na Amazônia, onde na maioria das vezes o fogo ocorre no sub-bosque da floresta. Entretanto, existem dificuldades na detecção dessas cicatrizes no Cerrado, pois alvos como corpos d'água, sombras de relevos e nuvens possuem assinatura espectral semelhante à das cicatrizes de fogo em algumas bandas do Landsat 5. Outra dificuldade se refere ao fato da detecção das cicatrizes ser subestimada em consequência da rápida regeneração da vegetação que oculta as cicatrizes (LOMBARDI, 2003).

Tendo em vista a necessidade de uma técnica eficiente que ofereça a automatização do processo de mapeamento da ocorrência do fogo no Cerrado, este trabalho buscou desenvolver uma metodologia para a detecção de cicatrizes de fogo, combinando uma análise de componentes principais (ACP) com a classificação por árvore de decisão. A ACP é uma técnica que propicia o redimensionamento dos dados, reunindo em componentes principais ordenadas por importância os dados que explicam a maior parte da variância obtida. Quando se trata de

sensoriamento remoto, outra vantagem é que a ACP elimina a redundância da informação contida nas bandas de uma imagem (GUPTA *et al.* 2013).

A árvore de decisão tem a função de particionar recursivamente um conjunto de dados até que cada subconjunto obtido deste particionamento contenha casos de uma única classe (GARCIA & ALVARES, 2001). Para isso, a técnica de árvores de decisão examina e compara a distribuição de classes durante a construção da árvore. O resultado obtido, após a construção de uma árvore de decisão, consiste na geração de dados organizados de maneira compacta, que são utilizados para classificar novos casos (BRAZDIL, 1999).

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi estimar a área anualmente queimada e a frequência do fogo em uma área de Cerrado no centro-oeste brasileiro ao longo de 13 anos (1999 – 2011), através de cicatrizes de fogo, testando uma técnica semiautomática aplicada a imagens Landsat.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende todo o Distrito Federal (DF). Esta área possui 5.814 km² e está localizada na região Centro-Oeste do Brasil, dentro do Estado de Goiás, entre os paralelos de 15°30' e 16°03' de latitude Sul e os meridianos de 47°18' e 48°17' de longitude Oeste (Figura 1).

O Distrito Federal é um dos locais designados para abrigar a Reserva da Biosfera do Cerrado, institucionalizada pela Lei nº 742, de 26 de julho de 1994, a qual alcança 40% do território do DF. O Cerrado é considerado um dos *hot spots* mundiais, pois está entre um dos 25 pontos do planeta que aliam as condições de alta biodiversidade e alto grau de ameaça de degradação (MYERS *et al.*, 2000).

2.1 Processamento digital de dados espaciais

O estudo foi feito a partir de uma série histórica (1999 – 2011) do Satélite Landsat 5 TM, órbita 221, ponto 71, com meses de aquisição entre junho e outubro (período de seca no DF), obtida através do acervo online do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foi utilizada 1 cena para cada ano de análise.

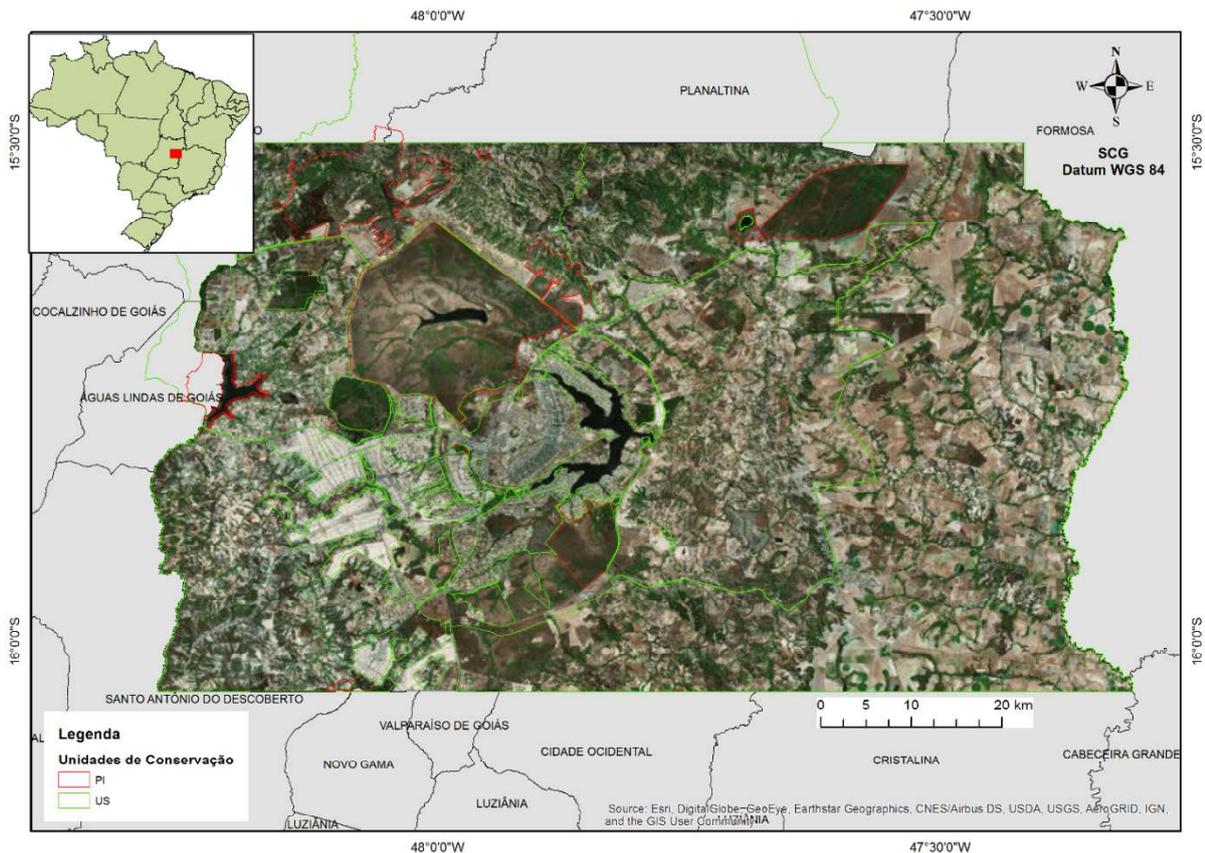


Fig. 1- Área de estudo: Distrito Federal e Unidades de Conservação de uso sustentável (US) e proteção integral (PI).

Para o processamento digital das imagens (e posterior execução do mapeamento e análise) foram usados os softwares ENVI 4.8® (Exelis) e ArcGis 9.3® (ESRI). O processamento das imagens foi iniciado pelo empilhamento das bandas (1 – 5 e 7), correção geométrica e calibração radiométrica (CHANDER *et al.*, 2009). As operações de correção objetivaram corrigir as distorções criadas no processo de aquisição da imagem para criar uma representação mais fiel da cena original.

As cenas do satélite Landsat foram corrigidas radiometricamente para valores físicos de reflectância no topo da atmosfera (TOA) de acordo com a metodologia proposta por Chander *et al* (2009).

A correção geométrica foi feita a partir de imagens ortoretificadas do sítio do Serviço Geológico Norte Americano (USGS). As imagens do sensor TM utilizadas foram georreferenciadas no sistema de projeção UTM, zona 23S e Datum WGS 84 no software ENVI 4.8. O georreferenciamento foi feito a partir do polinômio de primeira ordem e a reamostragem pelo vizinho mais próximo. A

correção geométrica individual foi aceita apenas se o RMS apresentasse o valor menor que 0,5 pixel, conforme sugerido por Jensen (2005).

Numa próxima etapa foi feita a transformação dos dados por ACP. Para remover a repetição de dados o método estatístico ACP transforma a imagem composta por bandas em uma nova imagem composta por Componentes Principais (CP), análogas às bandas. As bandas originadas são chamadas de bandas CP. Estas são combinações lineares das bandas espectrais originais não correlacionadas (GUPTA *et al.* 2013). O mesmo número de bandas de entradas é o número de bandas de saída. As imagens resultantes apresentaram cores mais vibrantes do que as imagens espectrais, pois seus dados não são correlacionados.

Para identificar as componentes com maior potencial de distinção entre as queimadas e os demais alvos, utilizou-se a imagem PC de 2010, que possuía cicatrizes de fogo bem definidas e conhecidas. Os valores de cada componente foram extraídos por amostras (*ROI's*) coletadas em áreas queimadas, água e sombra. Os valores médios de cada classe foram analisados comparativamente

de forma que as PCs 1, 2 e 5 mostraram maior diferença das áreas queimadas para as áreas de água e sombra (Figura 2). As componentes resultantes desta análise foram utilizadas para a definição dos valores digitais máximos e mínimos que correspondessem às cicatrizes de fogo.

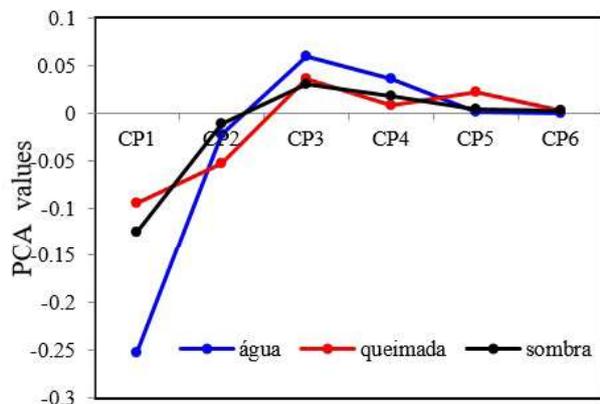


Fig. 2 - Comparação dos valores das componentes principais (CP) coletados em áreas de água, queimada e sombra.

2.2 Árvore de decisão

A classificação por meio da Árvore de Decisão foi elaborada a partir da observação visual do gráfico do perfil horizontal da imagem CP dentro e fora das áreas de cicatrizes de fogo. Os algoritmos inseridos em cada “*node*” da árvore foram criados para uma classificação binária com base nos valores observados que definiram se um pixel era queimado ou não. Essa constatação foi feita comparando a imagem CP com a imagem Landsat TM original observando áreas com cicatrizes de fogo conhecidas.

Devido aos fatores sazonais e variações na intensidade da reflectância das cicatrizes, as bandas CP de algumas imagens apresentaram comportamentos distintos do padrão observado. Em algumas imagens foram notadas variações nos valores dos pixels para áreas das cicatrizes de fogo. Em consequência dessa variação foram feitos ajustes nos valores dos limiares inseridos na árvore de decisão para a classificação das imagens dos anos 1999, 2000 e 2010 (Tabela 1). No entanto, esses ajustes são pequenos e não comprometeram a operacionalização do método.

2.3 Avaliação da técnica de mapeamento

A avaliação da acurácia foi testada utilizando a imagem classificada do ano de

2011 e a verdade de campo, por meio da análise sistemático-aleatória. No primeiro passo foi feita a sistematização da área do DF. Para isso uma grade de 5x5km foi traçada em todo o DF e dentro de cada célula foi aleatorizado 1 ponto, totalizando assim 261 pontos aleatorizados. Em seguida, um buffer de 5m foi feito em torno de cada ponto e por fim, a informação dos pontos foi extraída.

Tabela 1: Estrutura da árvore de decisão indicando a ordem dos *nodes* e CPs específicas em que foram aplicados os limiares de valores que classificaram as cicatrizes de fogo para o intervalo de 2001 a 2009, e valores específicos para os anos 1999, 2000, 2010 e 2011

<i>Nodes</i>	2001-2009; 2011	1999	2000	2010
N1:CP2	<-0.018	<-0.018	<-0.018	<-0.01
N2:CP1	<-0.0095	<0.0095	<0.0095	<-0.01
N3:CP5	>0.003	>0.003	>0.003	>0.0001
N4:CP1	>-0.23	<-0.17	<-0.20	>-0.23

Coordenadas X e Y foram adicionadas aos pontos e estes foram salvos em GPS Garmin 60 CSX. Uma visita de campo realizada no final do período seco (outubro) de 2011, permitiu conferir cada ponto, observando se havia ocorrido ou não a queimada, assumindo o mesmo desempenho do classificador para anos anteriores. A matriz de confusão foi calculada automaticamente a partir da ferramenta *Accuracy assessment*, implementada no software ERDAS®. Com os resultados da matriz de confusão foram determinados os erros de omissão, comissão e índice de Kappa, indicando o quanto a classificação representou a verdade de campo.

2.4 Análise da espacialização das cicatrizes

Após o mapeamento, as cicatrizes de fogo foram analisadas quanto à dimensão de suas áreas para cada ano e sua espacialização dentro das Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPIs). As UCPIs ocupam uma área total de 541,63 km² o que representa 9,22% da área de estudo e foram destacadas pois contribuem de forma significativa para soma da área afetada por fogo. O DF possui quatro UCPIs, duas Estações Ecológicas, uma Reserva Biológica e um Parque Nacional, onde extensas áreas de vegetação do Cerrado encontram-se

protegidas. Entretanto, devido ao contato de suas bordas com áreas públicas e privadas essas áreas se tornam susceptíveis e são severamente afetadas pelo fogo.

2.5 Relação entre área total das cicatrizes e precipitação acumulada na estação seca

Para compreender a relação das dimensões das cicatrizes mapeadas com o cenário climático de cada ano, foram utilizados os dados de precipitação derivados da série de precipitação pluviométrica (milímetros por mês) do produto 3B43 V6 do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) disponibilizados pela GES DISC DAAC (*Distributed Active Archive System*) da NASA. O pixel do TRMM tem uma área mínima de 0,25 grau. A área de estudo é coberta por oito pixels, dos quais foi calculada a média para obtenção da precipitação mensal de cada ano. Os dados foram acessados através da plataforma on-line do INPE (<https://www.dsr.inpe.br/laf/series/index.php>).

O período de junho a setembro foi definido como estação seca, já que é o período de estiagem no DF e quando os incêndios são mais frequentes. Foi então obtida a média da precipitação acumulada apenas para a estação seca (junho a setembro) dos anos com dados disponíveis (2000-2011). Dessa forma foi possível comparar a precipitação acumulada na estação seca de cada ano com a média de todos os anos. Esses dados de precipitação foram confrontados com os dados da soma da área das cicatrizes de fogo de cada ano.

2.6 Mapeamento da recorrência do fogo

Para cada ano do período estudado (1999 – 2011) obteve-se um mapa de cicatrizes de fogo totalizando 13 mapas ao final. Para obtenção da informação da recorrência do fogo os mapas foram analisados em formato matricial (*raster*) onde as células que representavam cicatrizes de fogo foram determinadas com valor 1 e as células representantes de locais não queimadas receberam valor 0. Uma soma algébrica dos *rasters* resultou em um mapa de recorrência de queima, contendo o número de vezes que um pixel foi afetado pelo fogo. Essa operação foi realizada no *software* ArcGis10.1® com o uso da ferramenta “calculadora de *raster*”.

3. RESULTADOS

Os resultados do estudo mostraram boa concordância entre o mapeamento dos incêndios florestais no DF e a realidade (visita ao campo). Observou-se maior área queimada em 2004, 2007, 2010 e 2011. As UC's mais atingidas foram: Estação Ecológica do Jardim Botânico, Fazenda Água Limpa (UnB), Reserva do IBGE e o Parque Nacional de Brasília. Estes resultados foram mais detalhados a seguir.

3.1 Acurácia da técnica de mapeamento

A acurácia global estimada através da matriz de confusão para o mapeamento das áreas atingidas por incêndios foi de 96,17%, indicando um excelente desempenho da técnica de classificação, valor acima do que está estabelecido por Congalton (1991). Além disso, verificou-se que a técnica subestima e superestima as áreas afetadas por incêndios em 50% e 20%, respectivamente. A omissão se deve, possivelmente, em menor grau ao efeito do processo de filtragem adotado na técnica e, na maior parte, aos efeitos da sazonalidade e da regeneração da vegetação.

Por fim, a estimativa do coeficiente *Kappa* em 59,64%, indicou um bom desempenho do mapeamento segundo Landis e Koch (1977). O *Kappa* condicional para a categoria de queimadas apresentou valor de 0.79. Este valor indica que a classificação é capaz de representar a verdade de campo em 79%. Este índice ainda é capaz de indicar o quão eficiente foi a classificação e a pequena aleatoriedade envolvida na técnica provando, assim, que é uma boa técnica para identificação de queimadas na região do Cerrado.

3.2 Dimensão e espacialização das cicatrizes de fogo

A maior área afetada por fogo foi registrada em 2010, com 293,23 km². Em 2007 e 2010 as áreas queimadas das UCPIs representaram 51,8% e 44,3% respectivamente da área total queimada. Em 2010 as UCPIs tiveram 24,21% de suas áreas queimadas.

No período estudado, com exceção de 2010, que foi o ano recorde em área queimada, as maiores cicatrizes de fogo foram registradas em 2004 (125,29 km²), 2007 (183,25 km²) e 2011 (196,44 km²) (Tabela 2).

Apesar de uma extensa área de cicatrizes de fogo observada em 2011 constatou-se que a contribuição das áreas queimadas nas UCPIs neste ano foi de apenas 0,58%. Entretanto, houve

um grande incêndio na Estação Ecológica Jardim Botânico, onde 29,13 km² foram queimados. O entorno dessa UCPI também foi severamente afetado pelo fogo, assim com uma extensa área de Cerrado da Reserva do IBGE e da Fazenda Água Limpa (UnB). O último grande incêndio, antes de 2011, ocorrido nessa área foi registrado em 2005, quando uma área de 24,50 km² foi afetada.

Tabela 2: Totais percentuais e em quilômetros quadrados das áreas de cicatrizes de fogo entre 1999 e 2011

Ano	Cicatrizes de fogo no DF		Cicatrizes de fogo nas UCPIs	
	km ²	%	km ²	%
2011	196,44	3,37	31,50	0,58
2010	293,23	5,04	129,86	24,21
2009	30,99	0,53	0,33	0,06
2008	53,02	0,91	2,22	0,41
2007	183,25	3,15	94,91	17,69
2006	44,38	0,76	4,90	0,91
2005	58,09	1,00	5,07	0,95
2004	125,29	2,16	9,67	1,80
2003	36,44	0,63	1,83	0,34
2002	33,50	0,58	4,68	0,87
2001	69,94	1,20	2,88	0,54
2000	51,60	0,89	7,19	1,34
1999	9,68	0,17	0,09	0,02

O Parque Nacional de Brasília foi a UCPI mais afetada pelo fogo em sua extensão. Nos anos de 2007 e 2010 essa unidade de conservação apresentou as áreas de 90,07 (~21%) e 113,51 km² (~27%) queimadas, respectivamente.

Foi observado o aumento do tamanho das áreas das cicatrizes de fogo no DF no período estudado. Analisando os anos com as maiores cicatrizes de fogo foi notado um aumento de 46,26%, entre 2004 e 2007, e de 134,04%, entre 2004 e 2010. O aumento observado entre 2004 e 2011 foi de 56,78%.

3.3 Precipitação e cicatrizes de fogo

A análise dos dados de precipitação acumulada na estação seca junto aos dados de cicatrizes de fogo mostra que nos anos com precipitação mais baixa foram registrados os maiores incêndios (2004, 2007, 2010 e 2011) (Figura 3). Os anos 2004, 2007, 2010 e 2011 apresentaram a precipitação da estação seca 96, 95, 94 e 84% (respectivamente) menor que a média do período 2000 a 2011. O inverso foi observado para os outros anos que tiveram precipitação acumulada na estação seca maior que a média, e apresentaram menores áreas de cicatriz de fogo (2001 a 2003; 2005, 2006, 2008 e 2009).

Foi observado um intervalo de dois anos entre os anos de grandes queimadas, 2004 a 2007 e 2007 a 2010. Entretanto, a quantidade de precipitação na estação seca parece ter sido determinante para a ocorrência das queimadas em nos anos 2004, 2007, 2010 e 2011.

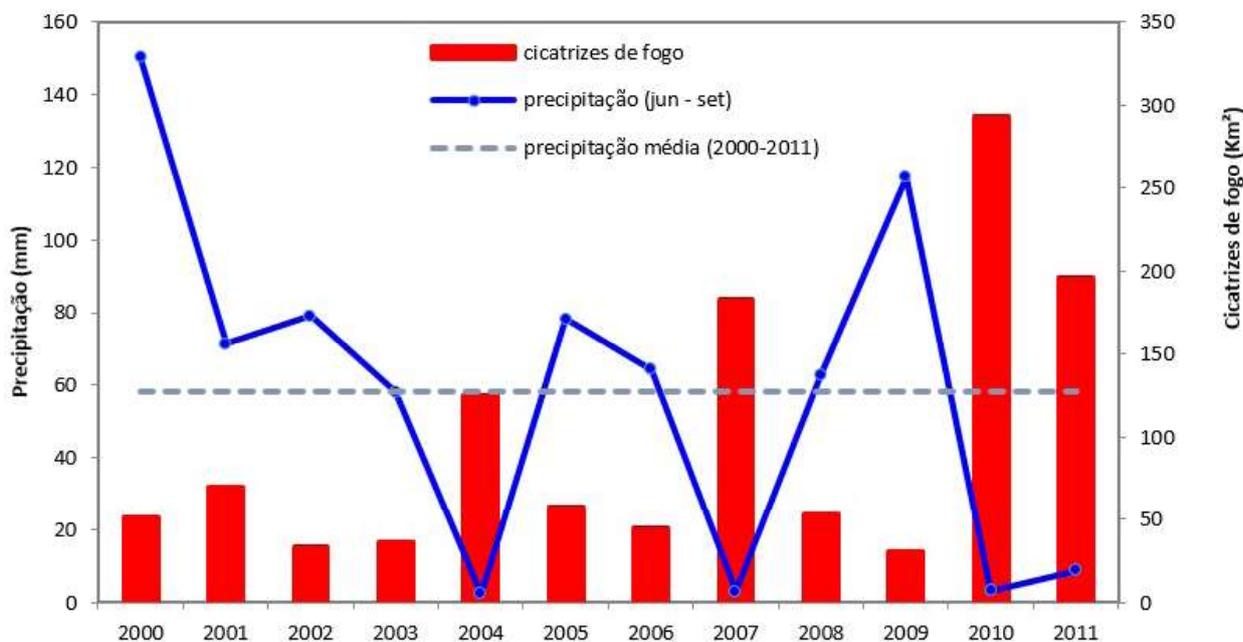


Fig. 3 - Precipitação e cicatrizes do fogo no período de análise.

3.4 Análise da recorrência de fogo

No período estudado foram identificadas áreas afetadas por fogo até dez vezes (Figura 4; Tabela 3). Entretanto a porção da área de estudo ocupada por essas áreas com elevada repetição do fogo é muito pequena. As áreas afetadas mais do que cinco vezes somaram apenas 2,36 km². Já as áreas queimadas entre uma e quatro vezes somaram 797 km². Neste mapeamento foi possível identificar áreas críticas onde a repetição do fogo foi elevada, mais de cinco vezes em 13 anos, a maior parte delas no interior de Unidades de Conservação.

Tabela 3: Área e porcentagem da recorrência do fogo no DF

Recorrência do fogo	Área (km ²)	%
1	654.55	11.26
2	109.87	1.89
3	25.75	0.44
4	6.49	0.11
5	1.41	0.02
6	0.58	0.01
7	0.29	0.01
8	0.07	0.0013
9	0.01	0.0002
10	0.0009	0.00002

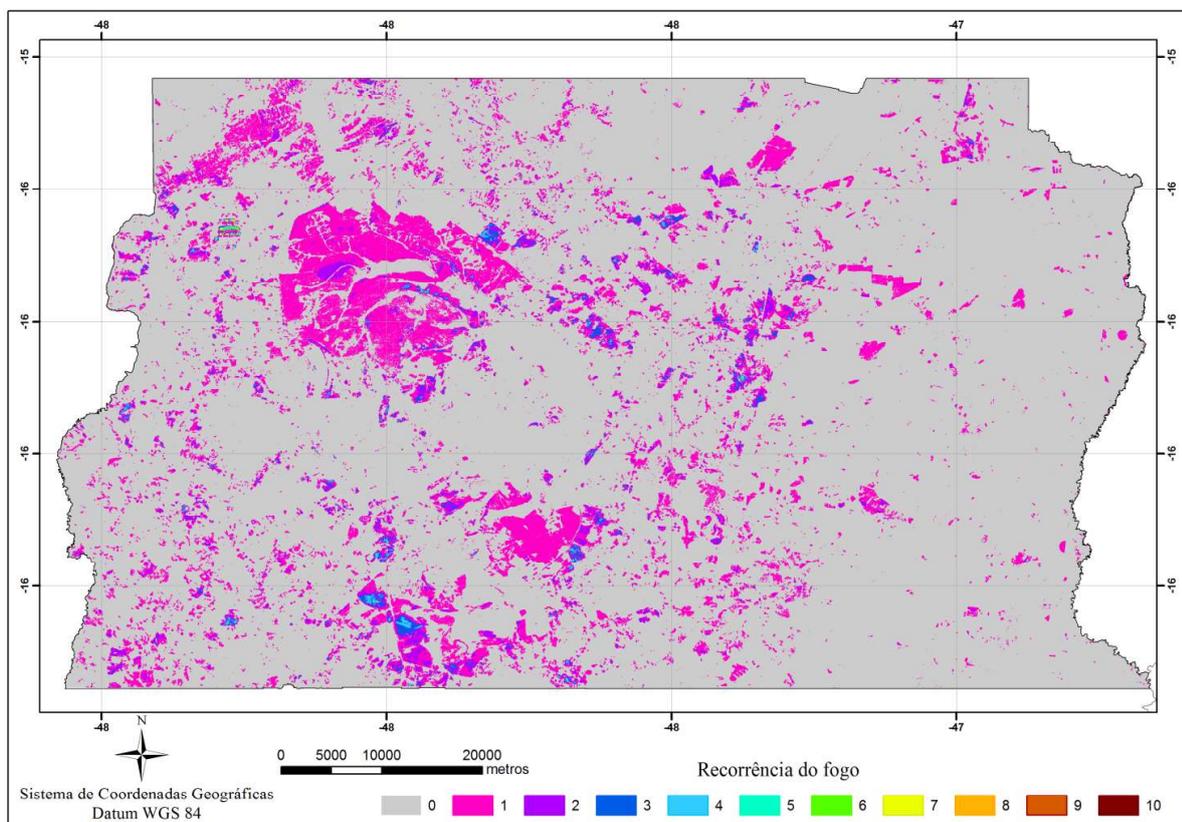


Fig. 4 - Recorrência do fogo no DF

O Parque Nacional de Brasília é a UCPI onde o fogo se repetiu mais vezes, sendo registrada a ocorrência de até sete vezes em algumas áreas dentro dessa UCPI. Na Estação Ecológica Águas Emendadas e na Reserva Biológica da Contagem, o fogo se repetiu até quatro vezes. Na Estação Ecológica do Jardim Botânico o fogo se repetiu em algumas áreas até duas vezes.

4. DISCUSSÃO

A técnica desenvolvida neste estudo mostrou desempenho satisfatório para o

mapeamento das queimadas na vegetação do Cerrado. Com base na análise de campo foi possível verificar que as queimadas antigas, que ocorreram meses antes da data da imagem adquirida ou tinham pequena intensidade, tiveram a resposta espectral ocultada devido a regeneração da vegetação e, portanto, não foram detectadas através da classificação. Uma alternativa viável seria a realização de monitoramento mensal, a fim de utilizar imagens com queimadas recentes (intervalos de 30 a 40 dias), tornando a técnica mais exata.

A técnica envolveu um processamento com rapidez e facilidade e pode ser usada para áreas com maior abrangência do bioma Cerrado. Entretanto, é importante salientar que para alguns anos, ajustes foram feitos nos valores limiares dos “*nodes*” da árvore de decisão. Os ajustes são necessários para reduzir erros de omissão ou comissão na detecção de cicatrizes de fogo.

Assim, na aplicação da técnica para outros anos é recomendável conferir a eficácia da classificação das cicatrizes. No caso de cicatrizes não detectadas, os valores espectrais devem ser analisados e devidamente ajustados na árvore de decisão. Liu *et al.* (2014) discutem sobre a limitação que se refere à escolha do valor do limiar e apontam estudos que desenvolveram métodos automáticos de definição dos valores dos limiares baseados em média e desvio padrão.

A utilização das imagens Landsat é uma vantagem tendo em vista que sua resolução possibilita o mapeamento das pequenas cicatrizes, com tamanho mínimo de 900 m².

Ao mapear os danos no dossel causados por fogo no sub-bosque de uma floresta na Amazônia, Morton *et al.* (2011) afirmaram que as imagens Landsat são essenciais para detectar queimadas menores que 50 ha, enquanto o sensor MODIS foi responsável pela detecção de queimadas de tamanho médio (50 – 500 ha) e grandes (>500 ha) em seu estudo.

Apesar de representarem a menor parte das queimadas, essas pequenas cicatrizes são derivadas de queimas recorrentes, provavelmente do uso para manejo de vegetação indesejada ou para estímulo de rebrota da pastagem, a partir das quais se iniciam os grandes incêndios. Sendo assim, o mapeamento dessas pequenas cicatrizes se torna fundamental para a execução das medidas de prevenção e controle do fogo.

Com a aplicação da técnica foi possível mapear as principais queimadas ocorridas de cada mês a qual se refere cada imagem. O mapeamento resultante deste trabalho não quantifica o total de queimadas ocorridas em cada ano do período 1999-2011, pois apenas uma imagem de cada ano foi utilizada, e não todas as imagens de cada ano. Contudo, foi possível detectar as principais queimadas ocorridas na estação seca. Este é o período quando as queimadas antrópicas normalmente ocorrem e costumam afetar as maiores proporções de áreas

(RAMOS-NETO & PIVELLO, 2000).

As maiores áreas queimadas se concentraram dentro das UCPIs em 2007 e 2010, anos marcados por grandes incêndios no DF. Os incêndios dentro de Unidades de Conservação estão relacionados principalmente à falta de manejo e estabelecimento de gramíneas invasoras, que aumentam a matéria seca no Cerrado. Estas áreas apresentam acúmulo de biomassa durante os anos e que ocasionalmente favorecem a ocorrência de incêndios extensos. Longos períodos sem manejo e sem queimadas naturais permitem o acúmulo da biomassa seca, aumentando a probabilidade de ocorrência de incêndios. Além disso, após o primeiro incêndio, caso a biomassa não seja totalmente consumida, o acúmulo de matéria morta e seca pode favorecer incêndios subsequentes mais severos (NEPSTAD *et al.*, 1999, COCHRANE, 2003, PIVELLO *et al.*, 2010).

O Parque Nacional de Brasília que foi a UCPI mais afetada por fogo possui grande área de contato, em seus 188 km de perímetro, com áreas urbanas e chácaras e é marcada pela invasão de gramíneas exóticas (*Melinis minutiflora* e *Brachiaria decubens*) que se constitui em um grave problema de manejo (HOROWITZ *et al.*, 2007). Zanin (2009) relatou maiores riscos de incêndios relacionados à problemática da dispersão de gramíneas invasoras de alto poder inflamável nas Unidades de Conservação.

Além das intervenções antrópicas e condições da vegetação, os fatores climáticos podem também afetar os regimes das queimadas. Os anos que apresentaram maiores áreas queimadas foram aqueles em que a precipitação no DF foi abaixo da média, com períodos de seca prolongados. Se esse padrão for recorrente, é esperado que em um cenário climático de secas severas, onde as chuvas se tornem escassas, haja um aumento considerável na frequência das queimadas. Na Amazônia estudos indicaram que a intensificação das secas está diretamente ligada ao aumento das queimadas (ARAGÃO *et al.* 2007;2008). Em nosso estudo foi observado que apesar dos incêndios registrados em 2010, quando provavelmente o fogo consumiu parte da biomassa inflamável, outro grande incêndio de magnitude similar ocorreu no ano seguinte. Dessa forma, pode-se dizer que além das condições físicas da vegetação, a baixa precipitação foi um fator determinante dos incêndios verificados na

área de estudo.

O aumento da frequência da ocorrência do fogo no Cerrado pode implicar em alterações na estrutura e composição da vegetação. Miranda *et al.* (2002) revisaram diversos estudos que relataram que incêndios frequentes podem causar diminuição da vegetação lenhosa através do aumento da mortalidade e diminuição da regeneração de espécies lenhosas. Esses autores afirmaram que a ocorrência de fogo a cada dois anos está mudando as fisionomias do Cerrado *sensu strictu* e campo sujo para uma formação mais aberta com predomínio de gramíneas. Essas alterações, em contrapartida, favorecem queimadas mais intensas e frequentes.

Pereira Júnior *et al.* (2014) modelaram a frequência do fogo em uma área de Cerrado através do mapeamento da repetição do fogo. Estes autores encontraram intervalos curtos entre ocorrências de fogo, variando entre três e seis anos, sendo os intervalos curtos para as fisionomias arbustivas, e os mais longos para as vegetações lenhosas. Em nosso estudo a repetição do fogo foi mapeada a fim de se identificar áreas críticas, onde o fogo se repetiu muitas vezes, as quais devem ser monitoradas com maior rigor. Entretanto, estudos futuros que investiguem a periodicidade com que há o retorno do fogo em cada área são encorajados para que haja um melhor planejamento em termos de medidas de prevenção.

Algumas Unidades de Conservação apresentaram áreas mais susceptíveis, onde foi registrada alta repetição do fogo. Nesse estudo focamos nas UCPIs, entretanto, é importante salientar que muitas áreas críticas se encontram no interior das Unidades de Uso Sustentável, como por exemplo, a Floresta Nacional de Brasília que apresentou uma área com repetição do fogo de até 10 vezes. É evidente que essa elevada repetição é consequência de uma ação antrópica direta, e essa área deveria ser mais bem monitorada. A quantificação espacialmente explícita da recorrência do fogo pode viabilizar a execução de um planejamento estratégico mais eficiente a ser realizado pelos órgãos governamentais responsáveis pela prevenção de desastres. As áreas críticas identificadas nesse estudo devem receber mais atenção das autoridades locais.

5. CONCLUSÃO

A técnica de classificação desenvolvida neste estudo possibilitou a detecção de cicatrizes de fogo na vegetação do Cerrado com boa exatidão e fácil utilização. A técnica apresentou melhor desempenho na classificação das cicatrizes de incêndios mais recentes. Deste modo, a aplicação desta técnica de mapeamento em uma avaliação mensal das cicatrizes propiciaria resultados mais acurados. Alternativamente, a classificação digital de imagens interanuais poderia melhorar o desempenho do classificador para detecção de cicatrizes do fogo na vegetação.

Os valores digitais utilizados nos algoritmos desenvolvidos para as árvores de decisão se aplicam para a classificação de áreas queimadas utilizando imagens LANDSAT5 TM. Entretanto, pequenos ajustes deverão ser feitos para imagens que apresentem bandas CP com valores digitais diferentes daqueles encontrados como padrão nas áreas queimadas.

Os resultados deste estudo revelaram que a maior área queimada entre 1999 e 2011 ocorreu em 2010. Nos anos de grandes incêndios, aproximadamente a metade das áreas afetadas encontravam-se no interior das Unidades de Conservação de Proteção Integral. Nestas áreas há grande acúmulo de biomassa da vegetação do Cerrado e, por isso, essas Unidades devem ser mais bem monitoradas e manejadas.

Os mapas de cicatrizes de fogo gerados por esse estudo podem ser utilizados na investigação da frequência do fogo e na modelagem da ocorrência do fogo, dando suporte às agências governamentais responsáveis por evitar e minimizar desastres naturais relacionados ao fogo.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, L.O.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Burn scars detection based on linear mixture model and vegetation indexes using multitemporal data

- from MODIS/TERRA sensor in Mato Grosso state, Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v.35, n.4, p. 453-464, 2005.
- ANDERSON, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MANUEL, G.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SAATCHI, S.S.; MALHI, Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; BARLOW, J.; BERENGER, E.; DUARTE, V. Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. **Global Biogeochemical Cycles**, v.29, n. 10, p.1739-1753, 2015.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences**. v.363, p. 1779–85, 2008.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophys. Res. Lett.** v.34, n. L07701, 2007.
- BRAZDIL, P. **Construção de Modelos de Decisão a partir de Dados**. Disponível em: <<http://www.ncc.up.pt/~pbrazdil/Ensino/ML/DecTrees.html>>. Acesso em: 5 de agosto de 2015.
- BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v.20, n.7, p.387-394, 2005.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n. 5, p. 893-903, 2009.
- COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v.421, p.913-919, 2003.
- COCHRANE M. A. Fire in the Tropics. In JOHN MASON, M.B.E. (Eds.) **Tropical Fire Ecology: Climate Change, Land Use, and Ecosystem Dynamics**. Berlin, Springer, 2009. 696p.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, p.35-46, 1991.
- COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.) **Fire in the Tropical Biota**. Berlin: Springer-Verlag, 1990. p. 82-105.
- DEVISSCHER, T.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O.; GALVÁN, L.; MALHI, Y. Increased Wildfire Risk driven by climate and development interactions in the Bolivian Chiquitania, Southern Amazonia. **PLoS ONE**, v.11, n. 9, p. 1- 29, 2016.
- FONSECA, M. G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; ANDERSON, L. O. Modelling fire probability in the Brazilian Amazon using the maximum entropy method. **International Journal of Wildland Fire**, v.25, n.9, p. 955-969, 2016.
- FRANÇA, H.; SETZER, A.W. AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.22, p.2449-2461, 2001.
- FRANÇOSO, R. D., BRANDÃO, R., NOGUEIRA, C. C., SALMONA, Y.B., MACHADO, R.B., COLI, G.R. Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado biodiversity hotspot. **Natureza e Conservação**, v. 13, n. 1, p. 35-40, 2015.
- GARCIA, S. C.; ALVARES, L. O. Árvore de decisão - Algoritmos ID3 e C4.5. **Cadernos de Informática**, Janeiro 2001, v. 01, n.01, p. 52-55 Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/cadernosdeinformatica/article/view/v1n1p52-55>>. Acesso em 15 de agosto de 2015.
- GUPTA, R. P.; TIWARI, R. K.; SAINI, V.; SRIVASTAVA, N.A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. **Advances Remote Sensing**. v.02, p. 111–119, 2013.
- 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.
- HOROWITZ, C.; MARTINS, C. R.; MACHADO, T.; **Espécies exóticas arbóreas, arbustivas e herbáceas que ocorrem nas zonas**

de uso especial e de uso intensivo do parque nacional de Brasília: diagnósticos e manejo. Centro Nacional de Informação, Tecnologias Ambientais e Editoração. Edições Ibama, Brasília, p. 5-58, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios**, 2015. Disponível em < <http://www.inpe.br/queimadas/index.php>> Acesso: 28 outubro 2015.

IPCC. **Climate Change 2014**. New York: Cambridge University Press, 2014. 169p.

JENSEN, J.R. **Introductory Digital Image Processing: a Remote Sensing Perspective**. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 544p., 2005.

KLINK, C.A., MACHADO, R.B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

LAL, R. Savannas and Global Climate change: Source or sink of atmospheric CO₂. In: FALEIRO, F. G.; NETO, A.L.F. **Savanas: Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade agronegócio e recursos naturais**, Brasília, Embrapa Cerrados, p.1198, 2008.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.159-174, 1977.

LIU, Y.; DAI, Q.; LIU, J.; LIU, S.; YANG, J. Study of burn scar extraction automatically based on level set method using remote sensing data. **PLoS One**, v.9, n.2, p. 1-11, e87480, 2014.

LOMBARDI, R.J.R. 2003. **Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/LANDSAT**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. INPE. São Jose dos Campos. INPE-12663-TDI/1006, 172 p.

MATRICARDI, E. A.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKIM, W. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v.34, n.4, p. 1057-1086, 2013.

MIRANDA, H.S.; BUSTAMANTE, M.M.C.;

MIRANDA, A.C. **The fire factor**. In OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds) *The Cerrados of Brazil – Ecology and natural history of a neotropical savanna*. Columbia University Press, New York, p.51-68, 2002.

MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; NAGOL, J.; SOUZA, C. M.; KASISCHKE, E. S.; HURTT, G. C.; DUBAYAH, R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**. v.115, p. 1706–1720, 2011.

MMA, IBAMA. **Monitoramento do bioma Cerrado 2009-2010**. Brasília: MMA, 2011. 65p. (Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite).

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. D.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n., p. 853- 858, 2000.

NASCIMENTO, I. V. Cerrado: o fogo como agente ecológico. **Territorium**, v.8, p.25-35, 2001.

NEPSTAD, D.C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. **Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fire. The Pilot Program to conserve the Brazilian rain forest**. World Bank, Brasília, Brazil, p.186, 1999.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. Spectral Characteristics Of Fire Scars In Landsat-5/Tm Images Of Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 2061-2078, 1993.

PEREIRA JUNIOR, A. C.; OLIVEIRA, S. L. J.; PEREIRA, J. M. C.; TURKMAN, M. A. A.2014. Modelling fire frequency in a Cerrado savanna protected area. **PLoS One** 9, v.9, n.7, p. 1-10, e102380, 2014.

PIVELLO, V.R.; OLIVERAS, I; MIRANDA, H. S.; HARIDASAN, M.; SATO, M. N.; MEIRELLES, S.T. Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. **Plant and Soil**, v. 337, n.1-2, p. 111–123, 2010.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, v.7, n..1, p. 24-39, 2011.

RAMOS-NETO, M.B.; PIVELLO, V.R.

Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: rethinking

management strategies. **Environmental Management**, v.26, n.6, p.675-684, 2000.

RATTER, J.A., RIBEIRO, J.F., BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado Vegetation and threats to its biodiversity. **Botanical Briefing**, v. 80, p. 223-230, 1997.

ROY, D.P.; LEWIS, P.E.; JUSTICE, C.O. Burned area mapping using multi-temporal moderate resolution data: a bidirectional reflectance model-based expectation approach. **Remote**

Sensing of Environment, 83: p.263-286, 2002.

SPERA, S.A., GALFORD, G.L., COE, M.T., MACEDO, M.N., MUSTARD, J.F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016.

ZANIN, R. **Aspectos da introdução das espécies exóticas: O capim-gordura e a braquiária no Parque Nacional de Brasília**. 2009. Dissertação (Mestrado). Centro de Desenvolvimento Sustentável/Universidade de Brasília, Brasília, 95 p. 2009.